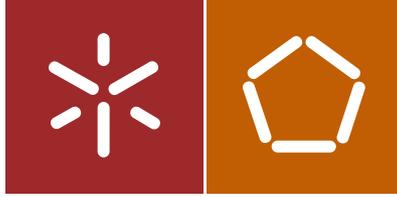




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sérgio José Ferreira Rodrigues

Estudo do Desempenho de
Moldes Híbridos em Moldação Por Injeção



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sérgio José Ferreira Rodrigues

Estudo do Desempenho de
Moldes Híbridos em Moldação Por Injeção

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor António Manuel C. Gomes Brito
Professor Pedro Miguel Gonçalves Martinho

Outubro de 2014

DECLARAÇÃO

Nome: Sérgio José Ferreira Rodrigues

Endereço Eletrónico: a35861@alunos.uminho.pt

Telefone: 919028526

Número do Cartão de Cidadão: 11651920

Título da Dissertação: Estudo do Desempenho de Moldes Híbridos em Moldação por Injeção

Orientadores: António Manuel Cerqueira Gomes Brito; Pedro Miguel Gonçalves Martinho

Ano de Conclusão: 2014

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ____ / ____ / _____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não seria possível sem a colaboração de algumas pessoas, às quais gostaria de agradecer os seus contributos.

Aos meus orientadores, os professores António Brito e Pedro Martinho pela sua disponibilidade em ajudar em todos os momentos e no apoio que deram ao longo do trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Polímeros, João Paulo Peixoto e Serafim Sampaio, que sempre prestaram um apoio imprescindível no uso dos equipamentos durante o processo de injeção.

Aos investigadores do Departamento de Engenharia de Polímeros, em especial ao CAE, pelo espaço disponibilizado, pelo auxílio e conhecimento que prestaram no desenvolvimento do meu trabalho.

Aos meus amigos, pelos incentivos que deram ao longo destes anos de curso e deste trabalho, em especial.

Por fim, às pessoas mais importantes da minha vida, à minha família, mas sobretudo aos meus pais, que sempre lutaram para que isto fosse possível. Em especial, quero dedicar este trabalho ao meu pai, e à sua memória, esteja onde ele estiver, estará sempre presente no meu pensamento.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Importantes sectores da indústria moderna, tais como a indústria automóvel, eletrónica, etc., são pressionados com a necessidade de colocar urgentemente novos produtos no mercado, e existe uma tendência para deixar de se produzir em massa para a produção de pequenas séries. Os moldes híbridos vieram solucionar parte dessa procura por parte das empresas, mantendo a estrutura padrão do molde, aliando as técnicas de prototipagem rápida para a produção dos blocos moldantes, sem que haja qualquer tipo de prejuízo nas propriedades mecânicas finais da peça injetada.

Os objetivos desta dissertação são a produção de peças através do processo de injeção por moldação, utilizando moldes híbridos com blocos moldantes produzidos em resina epóxidada com diferentes cargas metálicas (15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxidada e 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada, percentagens em peso). Os resultados obtidos foram comparados com os de um molde convencional, em aço, permitindo avaliar o comportamento dos diferentes tipos de blocos moldantes.

Para cada bloco moldante variaram-se as temperaturas de injeção e do molde, utilizando o mesmo material de injeção, polipropileno. Para avaliar as peças moldadas por injeção, estudou-se a morfologia e o comportamento mecânico na zona mais crítica da peça, a linha de soldadura. Em termos gerais, os resultados obtidos pelo bloco moldante com 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxidada teve resultados muito parecidos com o bloco moldante convencional em aço. As peças apresentaram excelentes propriedades mecânicas mas o bloco moldante com 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada, derivado da sua baixa condutividade térmica, apresentou valores mais baixos em relação ao módulo de elasticidade.

ABSTRACT

Important sectors of modern industry, such as automotive, electronics, etc., are pressed with the need to urgently put new products on the market, and there is a tendency to fail to mass produce for the production of small series. The hybrid molds came solve part of this demand from companies, while leaving the standard mold structure, combining the rapid prototyping techniques for the production of moldant blocks, without any prejudice on the final mechanical properties of the molded part .

The objectives of this work are the production of parts using the injection molding process using hybrid molds with moldant blocks produced in epoxy resin with different metal loads (15% Short Steel Fibers + 85% epoxy resin and 60 % aluminum powder + 40% epoxy resin , weight percentages) . The results obtained were compared with those of a conventional steel mold, allowing to evaluate the behavior of different types of moldant blocks.

For each moldant block is varied injection and mold temperatures, using the same injection material, polypropylene. To assess injection molded parts, we studied the morphology and the mechanical behavior in the most critical area of the workpiece, the welding line . In general, the results obtained by moldant block with 15% Short Steel Fibers + 85% epoxy resin had very similar results to the conventional steel moldant block. The parts had excellent mechanical properties but moldant block with 60% aluminum powder + 40 % epoxy resin derived from their low thermal conductivity, showed lower values than the modulus of elasticity.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xix
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Prototipagem Rápida.....	1
1.2. Moldes Híbridos	1
1.1. Motivação	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Organização da Dissertação	5
2. O PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO NO FABRICO DE MOLDES HÍBRIDOS	7
2.1. Moldação por Injeção	7
2.1.1. O Processo	7
2.1.2. Condições de Processamento.....	9
2.1.3. Comportamento de Polímeros Fundidos	14
2.1.4. Trocas de Calor em moldes	16
2.1.5. Molde de Injeção	27

2.2.	Materiais dos Blocos Moldantes.....	28
2.3.	Monotorização dos Blocos de Injeção	30
2.3.1.	Monitorização da Temperatura.....	30
2.3.2.	Monotorização da Pressão	32
2.4.	Vazamento de Resina Epóxidada	33
3.	PARTE EXPERIMENTAL.....	39
3.1.	Design da Peça.....	39
3.2.	Molde Híbrido.....	39
3.3.	Blocos Moldantes	41
3.3.1.	Materiais dos Blocos Moldantes.....	41
3.3.1.1.	Molde convencional	42
3.3.1.2.	Resina epóxidada com 60% de pó de alumínio.....	42
3.3.1.3.	15% Fibra Curta de Aço com Resina Epóxidada.....	46
3.3.2.	Processo de Vazamento de Resina Epóxidada	47
3.3.3.	Equipamentos para o processo de Vazamento de Resina Epóxidada.....	48
3.4.	Material de Injeção	49
3.5.	Máquina de Injeção.....	49
3.6.	Condições de Processamento.....	49
3.6.1.	Condições de processamento dos blocos moldantes na injetora	50
3.6.1.1.	Bloco Moldante em Aço	51
3.6.1.2.	Bloco Moldante com 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxidada	51
3.6.1.3.	Bloco Moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada.....	52
3.7.	Sistemas Funcionais do Molde	53
3.7.1.	Sistema de Extração.....	53

3.7.2.	Sistema de Alimentação	54
3.7.3.	Sistema de Controlo de Temperatura	56
3.7.4.	Sistema de Guiamento e Centragem.....	58
3.8.	Caraterização das peças injetadas nos Blocos Moldantes.....	58
3.8.1.	Caraterização Mecânica	58
3.8.2.	Caraterização do material injetado nos Blocos Moldantes.....	60
3.9.	Simulação MoldFlow	61
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
4.1.	Caraterização Mecânica	63
4.2.	Ensaio de Tração	63
4.2.1.	Bloco Moldante em Aço.....	63
4.2.2.	Bloco Moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida.....	68
4.2.3.	Bloco Moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida.....	73
4.3.	Caraterização Morfológica – Análise Microscópica.....	80
4.3.1.	Bloco Moldante 100% em Aço	80
4.3.2.	Bloco Moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida.....	82
4.3.3.	Bloco Moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida.....	83
4.4.	Simulação MoldFlow.....	86
5.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	ANEXO 1 Ficha técnica Biresin L74	93
	ANEXO 2 Ficha técnica Pó de Alumínio Rebelco.....	97
	ANEXO 3 Silicone HB Flex T4 com o endurecedor HB Flex T4-0, HB Química.....	99

ANEXO 4 Ficha técnica Total Petrochemicals PPH 5060.....	101
ANEXO 5 Ficha técnica Ferromatik Milacron K85-S	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Classificação das tecnologias em Rapid Tooling.....	1
Figura 2 O conceito de Molde Híbrido.....	2
Figura 3 Design de um Molde híbrido	2
Figura 4 Máquina de Moldação por Injeção.	7
Figura 5 Tempo de Ciclo do Processo de Moldação por Injeção.....	8
Figura 6 Diagrama da janela de processamento para um determinado polímero.....	10
Figura 7 Ambiente termomecânico – Fase de Injeção	11
Figura 8 Evolução típica de pressões no interior de uma moldação	12
Figura 9 Morfologia típica de uma peça em PP moldado por injeção	13
Figura 10 Estrutura <i>shish-kebab</i> da casca orientada.....	13
Figura 11 Zona de transição com fiadas transcristalinas e esferulites tipo β numa peça moldada em polipropileno	14
Figura 12 Comportamento típico de um fluido newtoniano e fluido com características pseudo-plásticas e viscoelásticas	15
Figura 13 Curvas típicas de um fluido com características viscoelásticas.....	16
Figura 14 Tempos de abertura, fecho do molde e de residência do material dentro do molde durante o ciclo de injeção	17
Figura 15 Trocas de Calor no molde de injeção.....	17
Figura 16 Entalpia específica em alguns polímeros semi-cristalinos.....	18
Figura 17 Variação dos diferentes tipos de temperatura e espessura da peça em relação ao tempo de arrefecimento	19
Figura 18 Variação das propriedades físicas com a temperatura	20
Figura 19 Evolução da temperatura na superfície moldante	21
Figura 20 Temperatura média do molde durante o ciclo de injeção	21
Figura 21 Área exposta do molde.....	22
Figura 22 Área de fixação do molde	23
Figura 23 Evolução da temperatura <i>a)</i> Numa cavidade em aço <i>b)</i> Numa cavidade em SSF/Epoxy.....	24
Figura 24 Canais de arrefecimento conformados	26
Figura 25 Estrutura de um molde de injeção.....	27

Figura 26 Dados de temperatura para o aço/aço (SS) e resina/aço (RS), nas zonas T1 (cavidade) e T2 (bucha).....	31
Figura 27 Temperatura na cavidade do molde <i>a)</i> molde híbrido <i>b)</i> molde convencional [13].	32
Figura 28 Dados da pressão nas combinações cavidade/bucha; <i>P1</i> - Cavidade, <i>P2</i> - Bucha.....	33
Figura 29 Processo de vazamento de resina	34
Figura 30 Parte frontal de um telemóvel	35
Figura 31 Bucha e cavidade produzidas em matriz epoxy	35
Figura 32 Áreas degradadas na bucha feitas pela maquinação da resina epóxida	35
Figura 33 Exemplo de uma simulação no software MoldFlow.....	37
Figura 34 Dimensões gerais da peça a injetar.	39
Figura 35 Molde Híbrido (design).....	39
Figura 36 Parte móvel do molde híbrido.....	40
Figura 37 Molde Híbrido.....	40
Figura 38 Bloco Moldante na Bucha.....	40
Figura 39 Design da Bucha em aço	41
Figura 40 Design da Bucha com posição.....	41
Figura 41 Bloco Moldante (design).....	41
Figura 42 Bloco Moldante em Aço.	42
Figura 43 Obtenção do bloco moldante a partir do processo de vazamento de resina na câmara de vácuo – <i>a)</i> Master; <i>b)</i> Formação do Molde em Silicone; <i>c)</i> Molde em Silicone para fazer o vazamento da resina epóxida	42
Figura 44 Equipamento de anti-sedimentação	43
Figura 45 Bloco moldante em 60% de pó de alumínio e resina epóxida.	43
Figura 46 Maquinação do bloco moldante de alumínio – <i>a)</i> Torno mecânico para furar os canais de arrefecimento; <i>b)</i> Maquinação das roscas laterais com saca-machos M10; <i>c)</i> Aspeto das furações no bloco moldante.	44
Figura 47 Master maquinado em Resina epóxida.....	45
Figura 48 Obtenção do bloco moldante com 15% de fibra curta de aço com resina a partir do processo de vazamento de resina na câmara de vácuo – <i>a)</i> Compósito de resina epóxida com fibra curta de aço; <i>b)</i> Vazamento do compósito para o molde de silicone; <i>c)</i> Máquina anti-sedimentação.....	46
Figura 49 Bloco moldante com 15% fibra curta de aço e resina epóxida	47

Figura 50 Equipamentos utilizados no processo de vazamento de resina epóxida – <i>a)</i> Misturadora; <i>b)</i> Câmara de Vácuo; <i>c)</i> Equipamento de Anti-Sedimentação; <i>d)</i> Forno.	48
Figura 51 Máquina de Injeção FERROMATIK MILAKRON K85-S.....	49
Figura 52 Degradação térmica numa peça injetada.....	51
Figura 53 Sistema de Extração do Molde Convencional.	53
Figura 54 Sistema de Extração do Molde Híbrido.	53
Figura 55 Localização do ponto do ataque da peça.....	54
Figura 56 Localização da linha de soldadura.	55
Figura 57 Localização da linha de soldadura nas peças injetadas.....	55
Figura 58 Exemplo de uma simulação do tempo de injeção do PPH 5060 com temperatura de injeção (200 °C) e temperatura do molde (20 °C).....	56
Figura 59 Sistema de arrefecimento da placa da cavidade.....	56
Figura 60 Sistema de arrefecimento da placa da bucha	57
Figura 61 Sistema de arrefecimento do bloco moldante híbrido.....	57
Figura 62 Sistema de guiamento e centragem do molde.....	58
Figura 63 Ensaio de tração na máquina de ensaios Zwick/Roell Z005 – <i>a)</i> Vista geral da máquina; <i>b)</i> Vista pormenorizada do provete para o ensaio de tração.	59
Figura 64 Serra de fita DeWalt.....	59
Figura 65 Corte do provete de ensaio – <i>a)</i> Vista geral da peça injetada; <i>b)</i> Provete cortado para o ensaio de tração.....	60
Figura 66 Preparação das amostras para a microscopia – <i>a)</i> Máquina de corte de amostras; <i>b)</i> Pormenor da zona da amostra para o corte; <i>c)</i> Amostras prontas nas lamelas de vidro; <i>d)</i> Microscópio de Transmissão Olympus.	60
Figura 67 Exemplo da simulação do tempo de enchimento na condição A ($T_{injeção} = 200$ °C; $T_{molde} = 20$ °C).....	61
Figura 68 Exemplo da simulação da pressão de injeção na condição E ($T_{injeção} = 225$ °C; $T_{molde} = 40$ °C)	61
Figura 69 Exemplo da simulação da pressão de injeção na condição I ($T_{injeção} = 250$ °C; $T_{molde} = 60$ °C)	62
Figura 70 Exemplo de um resultado da simulação da temperatura da frente do fundido na condição G ($T_{injeção} = 250$ °C; $T_{molde} = 20$ °C).....	62
Figura 71 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento A.	63

Figura 72 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento B.	64
Figura 73 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento C.	64
Figura 74 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento D.	65
Figura 75 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento E.	65
Figura 76 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento F.	66
Figura 77 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento G.	66
Figura 78 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento H.	67
Figura 79 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento I.	67
Figura 80 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento A.	68
Figura 81 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento B.	69
Figura 82 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento C.	69
Figura 83 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento D.	70
Figura 84 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento E.	70
Figura 85 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento F.	71
Figura 86 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento G.	71
Figura 87 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento H.	72
Figura 88 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento I.	72

Figura 89 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento A.	73
Figura 90 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento B.	74
Figura 91 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento C.	74
Figura 92 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento D.	75
Figura 93 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento E.	75
Figura 94 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento F.	76
Figura 95 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento G.	76
Figura 96 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento H.	77
Figura 97 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada – Condição de Processamento I.	77
Figura 98 Módulo de Elasticidade (E).	78
Figura 99 Tensão Máxima obtida para os três blocos moldantes em estudo.	80
Figura 100 Cascas dos provetes injetados no bloco moldante convencional.	81
Figura 101 Cascas dos provetes injetados no bloco moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxidada.	82
Figura 102 Cascas dos provetes injetados no bloco moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada.	84
Figura 103 Percentagem de Casca dos provetes injetados nos blocos moldantes.	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do material na cavidade	24
Tabela 2 - Propriedades da Biresin L74	44
Tabela 3 - Propriedades do composto Biresin L74 com o Pó de Alumínio	45
Tabela 4 - Condições de Processamento utilizadas.	50
Tabela 5 - Perfil de temperaturas do cilindro de injeção da injetora.	50
Tabela 6 - Condições de Processamento do bloco moldante 100% em aço.....	51
Tabela 7 - Condições de Processamento do bloco moldante com 15% em fibra curta de aço e 85% resina epóxidada.....	52
Tabela 8 - Condições de Processamento do bloco moldante com 60% pó de alumínio e 40% resina epóxidada.....	52
Tabela 9 - Resultado das percentagens de casca do bloco moldante 100% em Aço.....	81
Tabela 10 - Resultado das percentagens de casca do bloco moldante 85% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxidada.....	83
Tabela 11 - Resultado das percentagens de casca do bloco moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada	84
Tabela 12 - Valores reais de injeção vs Valores da Simulação no MoldFlow	86

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1	15
Equação 2	15
Equação 3	16
Equação 4	16
Equação 5	18
Equação 6	18
Equação 7	18
Equação 8	19
Equação 9	19
Equação 10	20
Equação 11	20
Equação 12	20
Equação 13	21
Equação 14	21
Equação 15	22
Equação 16	22
Equação 17	23
Equação 18	23
Equação 19	23
Equação 20	23
Equação 21	28
Equação 22	29

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

RT	Rapid Tooling
SLS	Sinterização Seletiva por Laser
SLSm	Sinterização Seletiva por Laser de metais
RP&T	Rapid Prototyping and Tooling
τ	Tensão de corte
η	Viscosidade
γ	Velocidade de corte
σ	Tensão normal
λ	Viscosidade extensional
ε	Velocidade de deformação
G	Módulo de elasticidade transversal
γ_r	Deformação de corte (recuperável)
E	Módulo de elasticidade longitudinal
ε_r	Deformação normal (recuperável)
Q_{PL}	Calor introduzido pelo polímero
Q_{TM}	Calor transferido pelo meio arrefecedor
Q_{AMB}	Fluxo de calor transferido para o ambiente
Q_{CONV}	Calor por convecção
Q_{COND}	Calor por condução
Q_{RAD}	Calor por radiação
m	Massa injetada de fundido
$h_I(E)$	Entalpia específica do plástico à temperatura de injeção (ejeção)
t_c	Tempo de residência do material no molde ou tempo de arrefecimento
S	Espessura da parede da peça
α_{eff}	Difusividade térmica efetiva média
T_{fund}	Temperatura do fundido
T_{cav}	Temperatura da parede da cavidade ou temperatura do molde
T_{ej}	Temperatura de ejeção
K	Condutividade térmica
ρ	Densidade
C_p	Calor específico

T_w	Temperatura na parede do molde
T_{min}	Temperatura mínima do molde
T_m	Temperatura do fundido
b_w	Espessura de penetração térmica do molde
b_m	Espessura de penetração térmica da moldação
A_L	Área exposta do molde
α	Coefficiente de transferência de calor por convecção livre do ar
Θ_{amb}	Temperatura do meio ambiente
Θ_{molde}	Temperatura do molde
ϵ	Fator de emissão para o aço
C_{rad}	Coefficiente de radiação do corpo negro
T_{amb}	Temperatura absoluta do meio ambiente
T_{molde}	Temperatura absoluta do molde
A_{fix}	Área de contacto molde do sistema de fixação
β	Fator de proporcionalidade
\dot{m}	Caudal do fluido arrefecedor
C	Calor específico do fluido
ΔT	variação da temperatura do fluido
SSF	Short steel Fibers
F_{max}	Força máxima aplicada na impressão
A_{max}	Área projetada de todas as impressões e do sistema de canais
P_{max}	Pressão máxima na impressão
F_{clamp}	Força de fecho de um molde
l_c	Comprimento crítico
σ_f	Resistência à tração da fibra
d	Diâmetro da fibra
τ_r	Tensão de corte da matriz/fibra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Prototipagem Rápida

Fabrico Rápido ou *Rapid Tooling* (RT) é uma tecnologia que adota técnicas de prototipagem rápida. É vista como um fator chave para que as empresas possam atender aos pedidos de desenvolvimento rápido do produto e redução do tempo de fabrico de moldes e baixo custo. Existem dois tipos de abordagem para o Rapid Tooling, a abordagem direta e abordagem indireta (figura 1), onde os moldes são produzidos a partir de padrões de prototipagem rápida. [1]

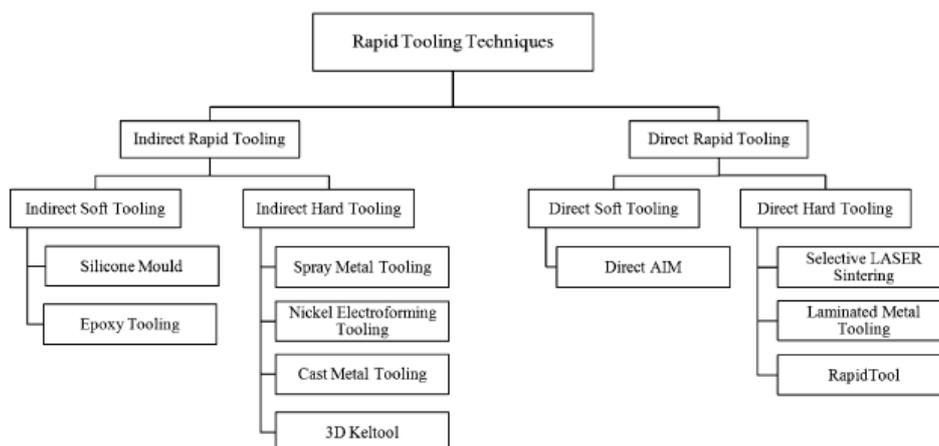


Figura 1 Classificação das tecnologias em Rapid Tooling [1].

Os moldes são produzidos diretamente através do conceito de sistema de prototipagem rápida. As ferramentas para fabrico de pequenas séries são conhecidas como ferramentas leves (*soft tools*), enquanto as ferramentas de fabrico em grande série são conhecidas como ferramentas duras (*hard tools*). [1]

Hoje em dia, o recurso ao Rapid Tooling está a tornar-se comum no fabrico que recorre ao uso de prototipagem rápida, como um dos passos para a obtenção de produtos como componentes das ferramentas para uso na moldação por injeção [1].

1.2. Moldes Híbridos

O fabrico de moldes com blocos moldantes produzidos em materiais alternativos e recorrendo a técnicas de Rapid Tooling (RT) é a base do conceito de moldes híbridos (figura 2). A indústria de moldes tem recorrido a estas possibilidades no

desenvolvimento de moldes para a produção de blocos moldantes, mantendo a estrutura padrão do molde na sua produção [1].

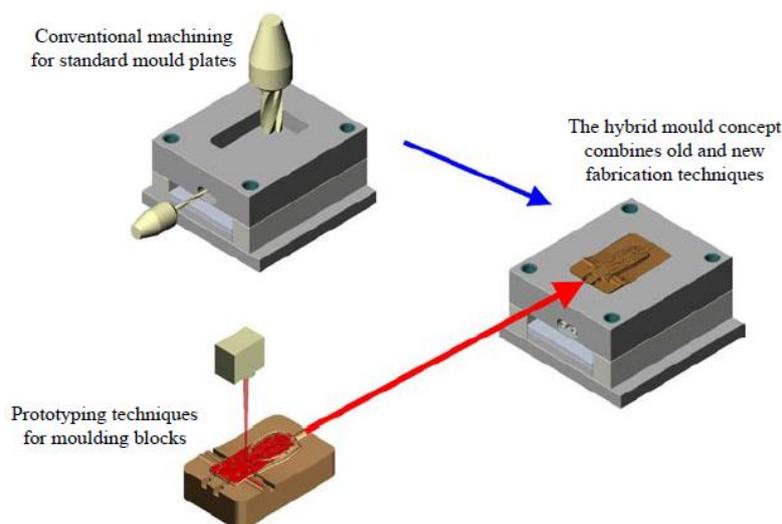


Figura 2 O conceito de Molde Híbrido [2].

Os moldes híbridos são uma nova abordagem para prototipagem rápida de moldes de injeção que combina a maquinação convencional da estrutura do molde com técnicas de prototipagem rápida para os blocos moldantes, bucha e cavidade (figura 3). Para o efeito, duas rotas são utilizadas para a produção de blocos moldantes: a Sinterização Seletiva por Laser (SLS) de pó à base de aço inoxidável (*hard tool*) e o vazamento sob vácuo de resina epóxida (*soft tool*) [1]. No caso em estudo, utiliza-se o processo de vazamento sob vácuo de resina epóxida.

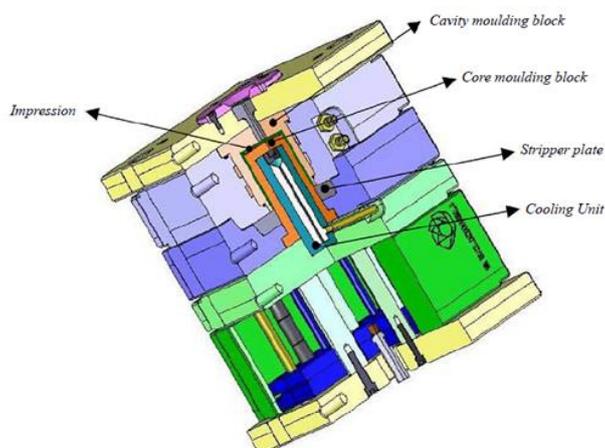


Figura 3 Design de um Molde híbrido [2].

A opção pelo processo de vazamento sob vácuo de resina epóxida é mais adequada para peças com maior detalhe, em relação à Sinterização Seletiva por Laser, mas não é apropriada para peças com paredes internas extensas ou com pequenas nervuras. A integridade estrutural composta por um material como a resina epoxídica, mais barato e com características mais fracas, pode ser comprometida durante a extração da peça. Nestes casos é importante avaliar bem o campo de tensões através da simulação durante a fase de desenho do molde [1].

1.1. Motivação

Muitas vezes existe a necessidade de produzir peças, ou séries-protótipo, principalmente na indústria automóvel e eletrónica. Na produção em escala, a escolha normalmente é quase sempre a técnica de moldação por injeção, por ser um processo rápido e recorrer ao uso de termoplásticos, que são de fácil transformação.

Em meados de 2006, e recorrendo às técnicas de Prototipagem Rápida (RP) e Rapid Tooling (RP) surgiu o projeto Hibrimolde em Portugal, fruto da longa cooperação entre a indústria e investigadores, por forma a introduzir o uso de técnicas de prototipagem rápida na produção de moldes de injeção. Para o fabrico de moldes híbridos, recorre-se aos métodos de prototipagem rápida e de maquinaria rápida ("Rapid Prototyping and Tooling" – RP&T Processes"). Os moldes assim concebidos são conhecidos por moldes híbridos por combinarem as técnicas convencionais com as de prototipagem rápida.

Como Portugal é um dos líderes mundiais no que diz respeito ao fabrico e conceção de moldes de injeção no setor industrial, torna-se importante desenvolver novos mecanismos de produção dos mesmos, tornando a indústria portuguesa mais competitiva e assim fomentar progressos nesta área, tal como aconteceu com o projeto Hibrimolde.

Nos últimos anos têm-se verificado alguns progressos no sector industrial dos moldes e plásticos com base no conceito de molde híbrido bastante no mercado industrial, principalmente na produção de pequenas quantidades, tornando assim o custo e o fabrico do molde mais económico, mais rápido e mais competitivo.

Relativamente aos materiais utilizados na construção dos blocos moldantes, o recurso ao uso de resina epóxida com cargas metálicas tem vindo a ser utilizado com alguma frequência, mas a grande percentagem na mistura continua ainda a ser as cargas metálicas (cerca de 70% a 80%), e normalmente constituída por partículas de aço ou cobre, devido à sua condutividade térmica e resistência. Torna-se urgente, portanto, tentar encontrar novos tipos de materiais que substituam as cargas metálicas já conhecidas, e variar também essa percentagem no compósito do bloco moldante (maior quantidade de resina epóxida e menor quantidade de carga metálica), por forma a verificar o seu comportamento na produção de peças através do processo de moldação por injeção, e a tornar a conceção de moldes híbridos mais económica e com preços mais competitivos, sem que haja prejuízo no tempo de construção e no custo de produção.

O fabrico dos blocos moldantes é bastante mais económico e mais rápido que o processo de maquinação convencional, logo é possível utilizar diversos tipos de material no mesmo bloco moldante, o que para a indústria se torna bastante mais económico em termos de custo final de peça, e num processo mais rápido no que diz respeito à conceção do molde.

1.2. Objetivos

Este projeto tem como objetivo avaliar o desempenho de blocos moldantes produzidos em resinas epóxida com diferentes tipos de cargas metálicas.

Primeiramente, iremos proceder ao fabrico de blocos moldantes em resinas epóxida com diferentes tipos de cargas metálicas, ao acabamento, à maquinação dos blocos moldantes e posterior montagem na estrutura do molde de injeção.

De seguida faremos simulações de enchimento, análises termomecânicas e de comportamento de fluxo, em software de simulação. Com o apoio das simulações, produzem-se as peças por moldação por injeção e caracterizam-se as mesmas nas zonas críticas por forma a verificar também o comportamento dos diferentes blocos moldantes.

1.3. Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

No Capítulo 1 faz-se a apresentação geral do trabalho, descreve-se o conceito do molde híbrido, e faz-se a descrição dos objetivos e estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 descreve-se o processo de moldação por injeção, as trocas de calor típicas que ocorrem durante o ciclo de moldação por injeção e referem-se alguns materiais utilizados na produção dos blocos moldantes dos moldes híbridos.

O Capítulo 3 descreve o trabalho experimental, desde a conceção dos três tipos de blocos moldantes ao processo de moldação por injeção efetuado para a produção das peças injetadas e respetiva preparação das amostras para a caracterização mecânica e morfológica.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, nomeadamente os da caracterização mecânica (ensaios de tração) caracterização, morfológica (microscopia), e os resultados das simulações.

As conclusões finais do trabalho realizado são apresentadas no Capítulo 5 fazendo-se ainda referência ao que se perspectiva ser o futuro dos moldes híbridos.

2. O PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO NO FABRICO DE MOLDES HÍBRIDOS

O desenvolvimento e concepção de moldes de injeção é bastante complexo e exige um certo conhecimento sobre o processo de moldação por injeção. Neste capítulo apresentam-se as noções básicas deste processo e o estado da arte mais relevante relacionado com os moldes híbridos.

2.1. Moldação por Injeção

O processo de moldação por injeção é o processo mais comum de fabrico de peças de plástico. É um processo muito rápido onde podem ser feitas peças de formas simples ou bastante complexas, e com dimensões bastante precisas. A moldação por injeção envolve o aquecimento do polímero até fundir para depois, com auxílio da pressão, forçá-lo a entrar dentro de um molde de injeção, onde arrefece e solidifica. Hoje em dia, mais de metade dos objetos em plástico são produzidos pelo processo de moldação por injeção [3].

2.1.1. O Processo

O processo de moldação por injeção é constituído essencialmente por duas fases: a máquina de injeção e o molde. A máquina de injeção é constituída pela unidade potência, unidade de controlo, unidade de plasticização/injeção e unidade de fecho (figura 4).

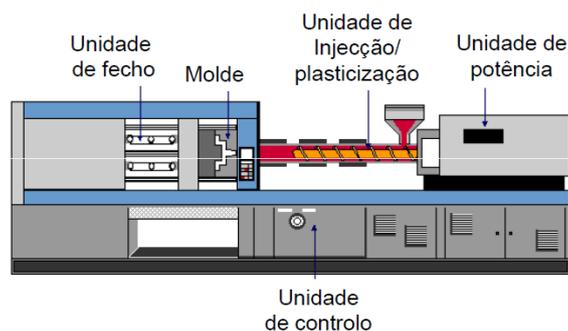


Figura 4 Máquina de Moldação por Injeção [4].

O Ciclo de injeção (figura 5) consiste no número de operações que acontecem na injetora, durante processo de moldação por injeção, entre duas moldações consecutivas. É fundamental obter uma excelente otimização do processo, para que seja competitivo e

económico. No processo industrial, o principal objetivo é a produção de peças atendendo às especificações, com o menor tempo possível [3].

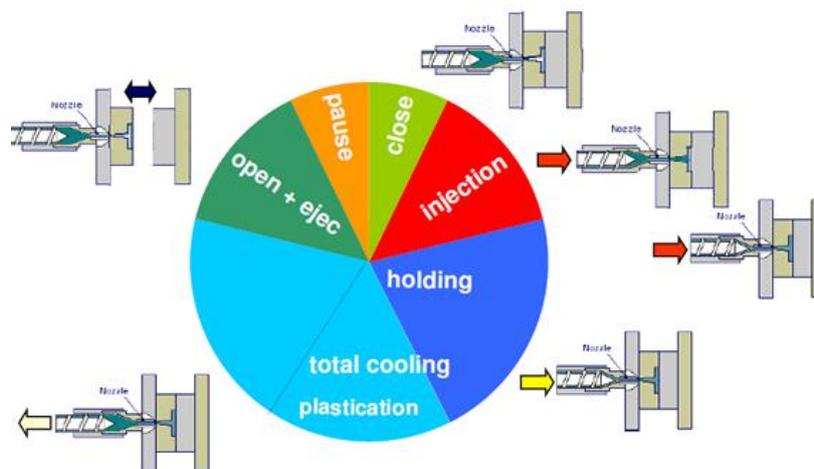


Figura 5 Tempo de Ciclo do Processo de Moldação por Injeção [3].

Fecho: O ciclo de injeção começa com o fecho do molde para que este fique apto a receber o polímero fundido plasticizado no interior do cilindro de injeção. O fecho do molde deve ser um processo tão rápido quanto possível, por forma a diminuir o tempo de ciclo, mas sem causar danos ao molde. Deverá ter-se em conta a velocidade da unidade de fecho e da força de fecho [3].

Injeção: Quando o bico de injeção toca no molde. O parafuso é empurrado axialmente para a frente e o polímero fundido flui para o interior do molde. A velocidade de injeção é selecionada por forma a assegurar o preenchimento total da cavidade do molde [3].

Pressurização: Após o preenchimento do interior do molde, é necessário pressurizar novamente o seu interior, por forma a reduzir possíveis empenos e contração nas peças, e obter um preenchimento completo da moldação. Contudo, a pressurização não deverá ter um valor muito elevado, por forma a não causar danos na peça moldada e dificultar a extração da mesma. Esta fase termina com o recuo do parafuso no interior do cilindro de injeção [3].

Plasticização: Assim que recua, o parafuso começa a plasticizar mais material. O polímero é plasticizado desde a forma de pequenos grânulos, sob o efeito combinado da condução de calor das com as resistências de aquecimento e dissipação viscosa

interna, resultante da rotação do parafuso. À medida que o polímero se move para a frente em direção à ponta do parafuso, que é pressurizado, este causa a retração do mesmo. Quando o volume de material desejado é atingido, o parafuso pára de rodar. O principal objetivo da fase de plasticização é fundir e homogeneizar o polímero no interior do cilindro e manter a temperatura suficientemente alta para fazer a injeção. A moldação ainda se encontra no interior do molde [3].

Arrefecimento: O arrefecimento é essencialmente uma fase de dissipação do calor da peça para o molde. Depende da espessura da peça, do tipo de polímero, do projeto do molde, especialmente do seu sistema de refrigeração. A fase de arrefecimento termina quando a peça moldada atinge a temperatura ideal para que seja extraída sem qualquer problema. Um tempo de ciclo de arrefecimento mais longo permite que se reduza o nível de tensões internas da peça no interior do molde [3].

Abertura do Molde/Extração: Quando termina o tempo de arrefecimento, o molde abre. O tempo para esta operação depende do tipo de máquina, nomeadamente da sua unidade de fecho, do peso do molde e do curso de abertura. Com um sistema apropriado, a peça pode ser separada automaticamente do sistema de alimentação [3].

Pausa: O tempo de pausa é o período que existe depois da extração da peça moldada. É um tempo não produtivo. É praticamente instantânea, mas pode ser prolongado se for necessária a intervenção para fazer a extração manual da peça, reposição de insertos no molde, ou para o uso de um robot. Neste caso, o tempo de pausa é dependente da habilidade do operador da máquina de injeção. Tempos longos de pausa afetam drasticamente o processo de reprodutibilidade [3].

2.1.2. Condições de Processamento

No processo de moldação por injeção, o material escolhido tem de cumprir certos requisitos, tais como: performance mecânica, resistência à temperatura e tolerâncias dimensionais, que dependem das condições de processamento utilizadas [3]. Parâmetros como a temperatura de injeção, a pressão, a temperatura do molde e a taxa de fluxo, podem influenciar as propriedades finais na peça. Assim, o ajuste dos parâmetros de injeção é importante, especialmente em molde híbridos. As condições ideais para a moldação pelo processo de injeção dependem do polímero e são muito

influenciadas pelas temperatura e pressão do fundido. Terá, portanto, de se determinar as condições ideais para a temperatura de injeção e pressão através de uma janela de processamento, conforme exemplo da figura 6, [4].

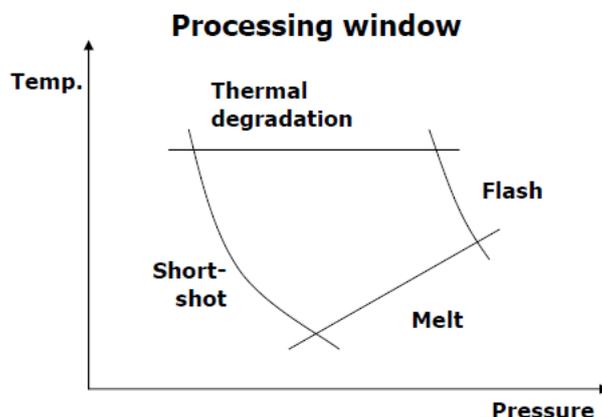


Figura 6 Diagrama da janela de processamento para um determinado polímero [5].

A área do interior da janela de processamento indica as temperaturas e pressões indicadas para um determinado polímero. Como se verifica no diagrama, existem 4 curvas a ter em conta: em cima, *Termal Degradation*, o polímero degrada termicamente. Na curva do fundo, *Melt*, o polímero é sólido ou não pode fluir. Na curva do lado esquerdo, *Short-Shot*, o molde não consegue ser completamente cheio. E do lado direito, a curva *Flash*, o material fundido escoia a alta pressão, criando mantas finas associadas à peça moldada nas linhas de separação do molde [5].

As condições de processamento podem ser divididas em 2 grupos: as variáveis operativas e os parâmetros do processo. A definição de ambas as condições de processamento determina a qualidade das peças e as suas propriedades. As propriedades das peças moldadas por injeção são muito sensíveis às condições de processamento usadas na sua produção [3].

Variáveis Operativas: São introduzidos na máquina de injeção, por exemplo temperaturas, pressão, velocidades, tempos, cursos, etc.) [3].

- **Temperaturas:** resistências do cilindro de injeção, molde e óleo
- **Pressões:** Injeção, 2ª pressão, pressão de recuo
- **Velocidades:** injeção, rotação do parafuso, abertura/fecho do molde

- **Tempos:** injeção, pressurização, arrefecimento
- **Cursos:** parafuso, molde

A definição das condições de processamento determina o ambiente termomecânico aplicado ao polímero durante o ciclo de moldação (Figura 7). O ambiente afeta a morfologia do polímero desenvolvido no processamento e, conseqüentemente, as propriedades de moldação (por exemplo: dimensão, propriedades mecânicas, etc.) [3].

As propriedades de polímeros moldados são muito sensíveis ao método de processamento e as condições utilizadas para o seu fabrico [3].

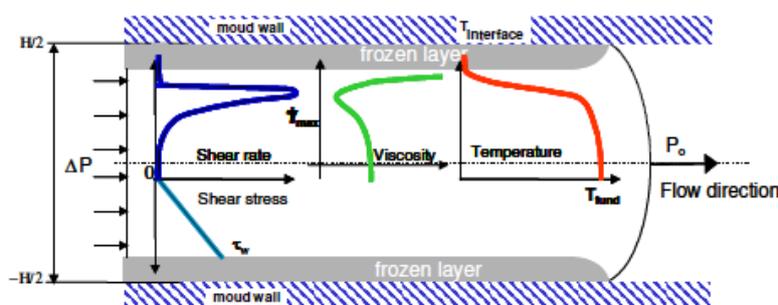


Figura 7 Ambiente termomecânico – Fase de Injeção [3].

Durante o ciclo de moldação por injeção, o material é sujeito a um ambiente termomecânico complexo. O fluxo de polímero fundido para o interior de uma moldação é um exemplo típico de fluido instável, não-isotérmico, com um fluxo tridimensional de um fluido viscoelástico compressível. Durante este processo, cada partícula de material é sujeita a diferentes histórias térmicas e mecânicas. Quando o material fundido e homogêneo escoar para a impressão, é formada uma camada congelada de material solidificado devido às paredes do molde frias [6].

A taxa de corte tem um valor máximo entre a camada solidificada e o fundido, e nula na zona do centro. A taxa de arrefecimento é alta junto das paredes do molde, onde a orientação causada pelas tensões induzidas pelo fluxo não é capaz de relaxar. A camada interior vai arrefecendo lentamente, devido ao efeito de isolamento do polímero já solidificado [6].

O gradiente térmico e contração resultantes introduzem tensões residuais nas moldações. Todas estas variáveis, em conjunto com a variação da pressão na impressão do molde, definem o ambiente termomecânico que restringe o desenvolvimento global da morfologia do polímero e afeta as propriedades mecânicas finais do produto [6].

Se o historial termomecânico das variáveis (pressão, temperatura, fluxo e taxa de arrefecimento), podem ser monitorizados diretamente ou indiretamente na impressão, as propriedades do produto moldado poderão ser previstas com precisão [6]. A figura 8 mostra uma evolução típica de pressões no interior de uma moldação.

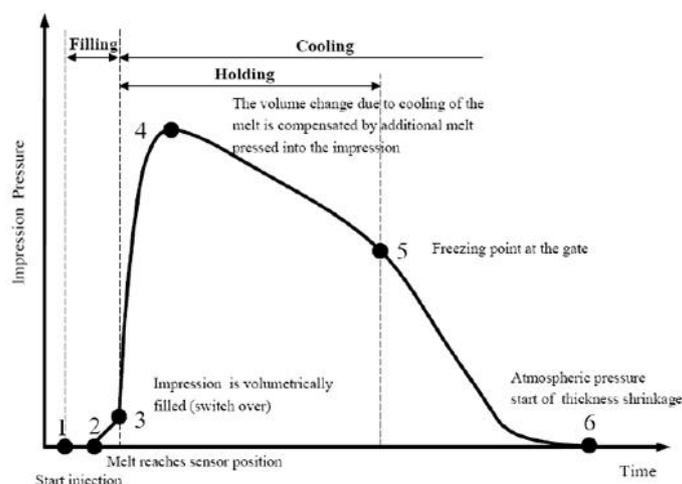


Figura 8 Evolução típica de pressões no interior de uma moldação [6].

No processo de moldação por injeção, as tensões longitudinais e as tensões de corte, a que o polímero é sujeito até encher o molde, são muito elevadas, o que tem como efeito a orientação das macromoléculas na direção do fluxo. O arrefecimento brusco do polímero orientado, ao entrar em contato com as paredes frias do molde, conduz a que parte dessa orientação seja preservada, principalmente junto às paredes da peça onde o arrefecimento é mais rápido e a orientação do sentido do fluxo do material injetado tem menos possibilidades de relaxar. A cristalização ocorre, portanto, em presença de orientação molecular e origina, por isso, morfologias típicas bastante diferentes dos restantes processos de moldação conhecidos. A estrutura é laminada e podem conhecer-se pelo menos 3 camadas constituintes: um miolo esferulítico e duas camadas exteriores (cascas), geralmente não esferulíticas e com orientação molecular elevada. A figura em baixo (figura 9) mostra este tipo de estrutura numa peça em polipropileno [7].

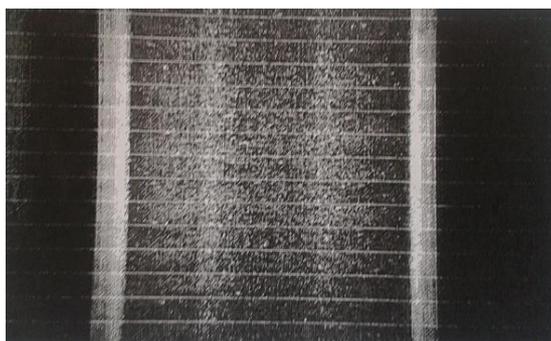


Figura 9 Morfologia típica de uma peça em PP moldado por injeção [7].

Esta morfologia é a consequência das condições em que ocorre a cristalização. Na casca orientada as tensões a que o material foi sujeito causaram o aparecimento de feixes de moléculas estendidas. Como a orientação molecular promove a cristalização, os feixes orientados cristalizam a temperatura superior e promovem a nucleação do material circundante onde a orientação é inferior. Este material cristaliza formando lamelas de cadeias dobradas que crescem lateralmente a partir dos feixes fibrosos, como se mostra na Figura 10. Esta estrutura, designada de *shish-kebab* causa um alinhamento muito elevado das cadeias moleculares na direção do fluxo, o que confere uma grande anisotropia (birrefringência) e resistência mecânica ao material [7].

À medida que se percorre a espessura da peça em direção ao interior e até ao núcleo (miolo) o efeito da orientação na cristalização do polímero vai-se atenuando. No núcleo, o polímero cristaliza em repouso e forma uma estrutura esferulítica [7].

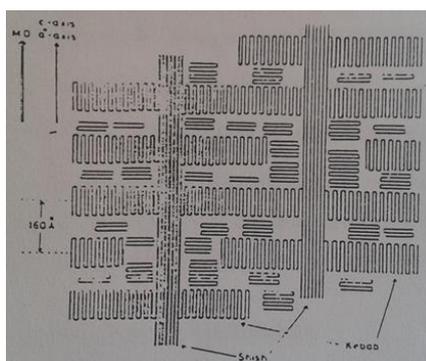


Figura 10 Estrutura *shish-kebab* da casca orientada [7].

Entre o meio esferulítico e a zona orientada exterior deteta-se, geralmente, a presença de uma zona de transição. Esta zona, embora seja na sua maioria esferulítica, ainda mostra zonas onde a orientação molecular está patente. O efeito deteta-se pela

presença de estruturas transcristalinas, nucleadas por cordões fibrosos à volta dos quais crescem esferulites incompletas, como se pode observar na Figura 11 [7].

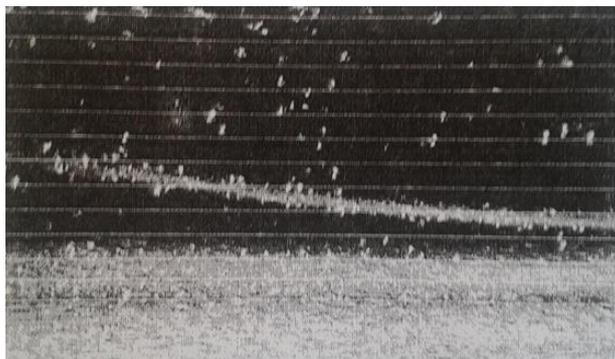


Figura 11 Zona de transição com fiadas transcristalinas e esferulites tipo β numa peça moldada em polipropileno [7].

A caracterização morfológica das peças moldadas por injeção em materiais semi-cristalinos, usando microscopia de luz polarizada, inclui:

- medição da espessura das diversas camadas constituintes
- medição das dimensões das esferulites do miolo
- medição da birrefringência da casca através da espessura

As variáveis de processamento, nomeadamente as temperaturas de injeção e do molde e a velocidade de injeção são as que mais afetam a morfologia das peças que, por sua vez, influencia as propriedades mecânicas das mesmas [7].

Parâmetros do Processo: Fatores que não podem ser alterados (facilmente) durante a produção. São dependentes da geometria do molde/peça (exemplo: espessura), das características específicas do equipamento: *a*) Máquina (exemplo: tipo de bico, tipo de controlo, etc.); *b*) Molde (exemplo: tipo de alimentação e sua localização, sistema de arrefecimento, etc.); *c*) Propriedades do Material [3].

2.1.3. Comportamento de Polímeros Fundidos

Os polímeros fundidos não são newtonianos, apresentam, normalmente, características pseudo-plásticas e viscoelásticas (figura 12) [8].

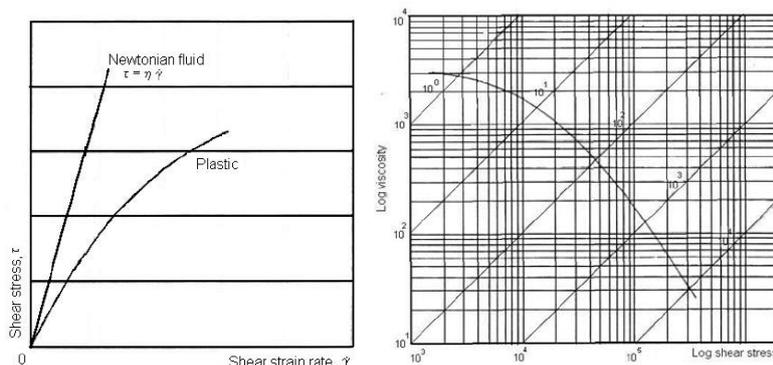


Figura 12 Comportamento típico de um fluido newtoniano e fluido com características pseudo-plásticas e viscoelásticas [8].

O fluxo em canais de secção constante é resultante do campo de tensões de corte que lhe é imposto,

Equação 1:

$$\tau = \eta \gamma$$

em que:

τ - Tensão de corte (Pa)

η - Viscosidade (Pa.s)

γ - Velocidade de corte (s^{-1})

Quando há variação da secção transversal de escoamento, o fundido fica sujeito a esforços normais,

Equação 2:

$$\sigma = \lambda \varepsilon$$

em que:

σ - tensão normal (Pa)

λ - viscosidade extensional (Pa.s)

ε - velocidade de deformação (s^{-1})

A informação sobre a viscosidade extensional dos polímeros é de difícil obtenção. Como aproximação, pode considerar-se:

- A viscosidade extensional é independente da magnitude da tensão aplicada
- Para baixos valores da tensão, $\lambda = 3 \eta$

A natureza viscoelástica dos polímeros manifesta-se quando estes materiais se encontram fundidos (figura 13). De facto, para além das características viscosas referidas, a resposta de um fundido polimérico sob tensão tem uma componente elástica [8]. Assim:

Equação 3:

$$\tau = G \cdot \gamma_r$$

em que:

τ - tensão de corte (Pa)

G - módulo de elasticidade transversal (Pa)

γ_r - deformação de corte (recuperável)

Equação 4:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_r$$

em que:

σ - tensão normal (Pa)

E - módulo de elasticidade longitudinal (Pa)

ε_r - deformação normal (recuperável)

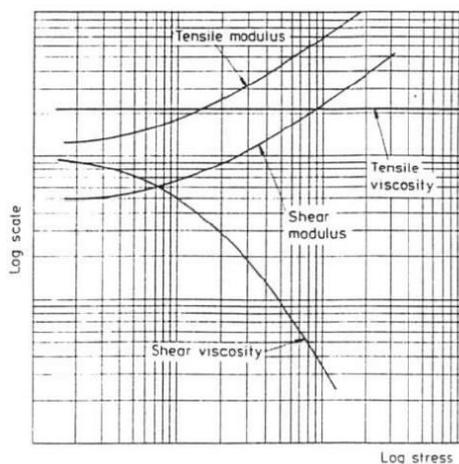


Figura 13 Curvas típicas de um fluido com características viscoelásticas [8].

2.1.4. Trocas de Calor em moldes

Durante o ciclo completo de injeção, o tempo de residência do material no interior do molde é superior ao tempo que se segue desde a abertura do molde, extração

da peça, tempo de pausa e tempo de fecho do molde (figura 14), por forma a iniciar uma nova injeção.

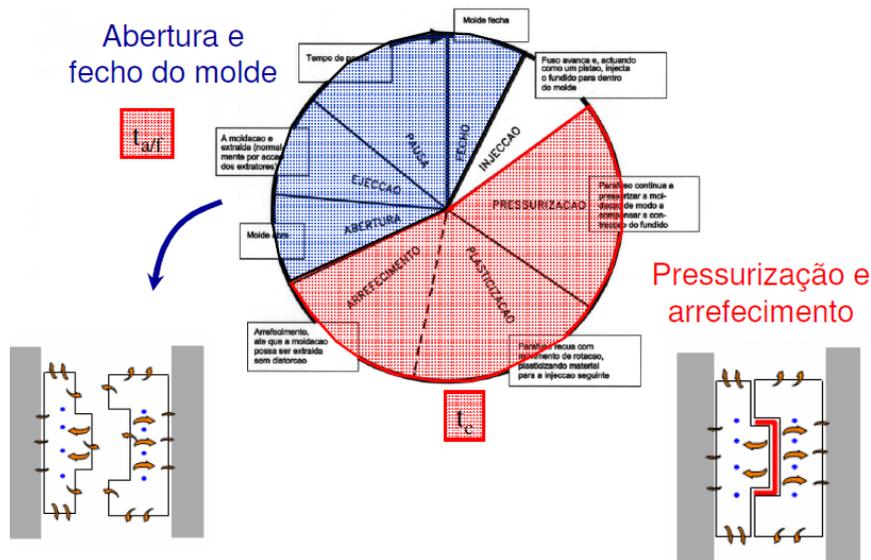


Figura 14 Tempos de abertura, fecho do molde e de residência do material dentro do molde durante o ciclo de injeção [9].

Durante a fase de injeção, o material fundido está sujeito a pressurizações e arrefecimento, e em contato com a superfície moldante, irá transferir energia sob a forma de calor. O molde irá transferir todo este fluxo de calor para o meio ambiente, quer seja por condução, por convecção ou por radiação (figura 15).

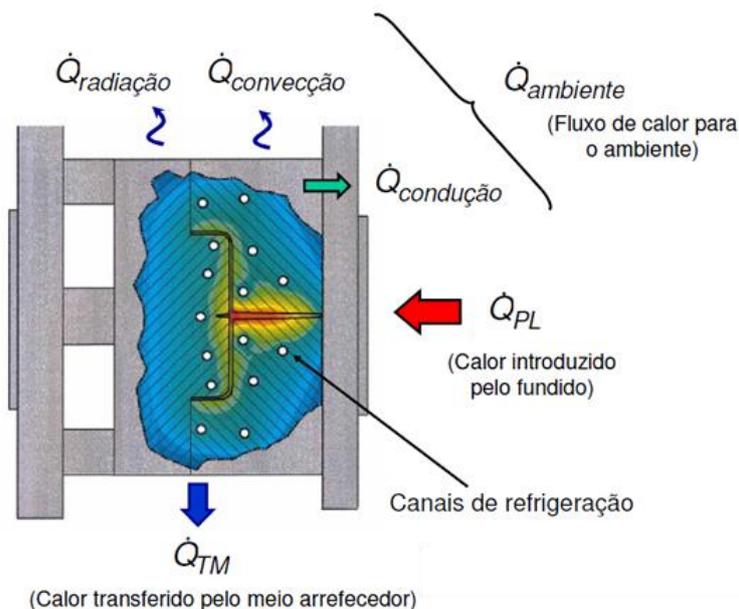


Figura 15 Trocas de Calor no molde de injeção [9].

Balço Térmico:**Equação 5:**

$$\sum_I \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{PI} = 0$$

Onde,

Equação 6:

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{rad}$$

Q_{PL} - Calor introduzido pelo polímero

Q_{TM} - Calor transferido pelo meio arrefecedor

Q_{Amb} - Fluxo de calor transferido para o ambiente

Q_{conv} - Calor por convecção

Q_{cond} - Calor por condução

Q_{rad} - Calor por radiação

Calor transportado pelo fundido:**Equação 7:**

$$Q_{PI} = \frac{m(h_I - h_E)}{t_c}$$

m – Massa injetada de fundido [g]

h_I (E) – Entalpia específica do plástico à temperatura de injeção (ejeção) [J/g]

t_c – Tempo de residência do material no molde ou tempo de arrefecimento [s]

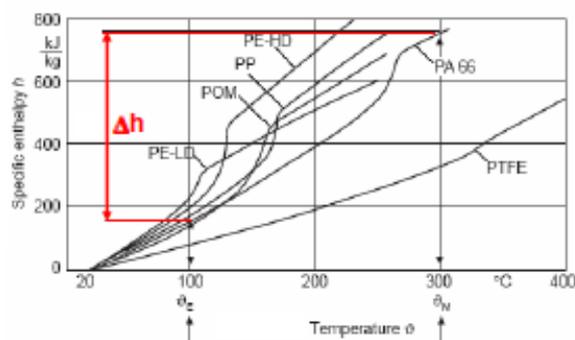


Figura 16 Entalpia específica em alguns polímeros semi-cristalinos [9].

Tempo de Arrefecimento:**Expressão de Bubken:****Equação 8:**

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha_{eff}} \ln(KY)$$

Equação 9:

$$Y = \frac{T_{fund} - T_{cav}}{T_{ej} - T_{cav}}$$

t_c – Tempo de arrefecimento (incluindo pressurização) [s]

s – Espessura da parede da peça [mm]

α_{eff} – Difusividade térmica efetiva média [m^2/s]

T_{fund} – Temperatura do fundido [$^{\circ}C$]

T_{cav} – Temperatura da parede da cavidade ou temperatura do molde [$^{\circ}C$]

T_{ej} – Temperatura de ejeção [$^{\circ}C$]

K – Coeficiente dependente da espessura da peça

$K = 4/\pi$ para peças finas

$K = 8/\pi^2$ para peças espessas ($> 3mm$)

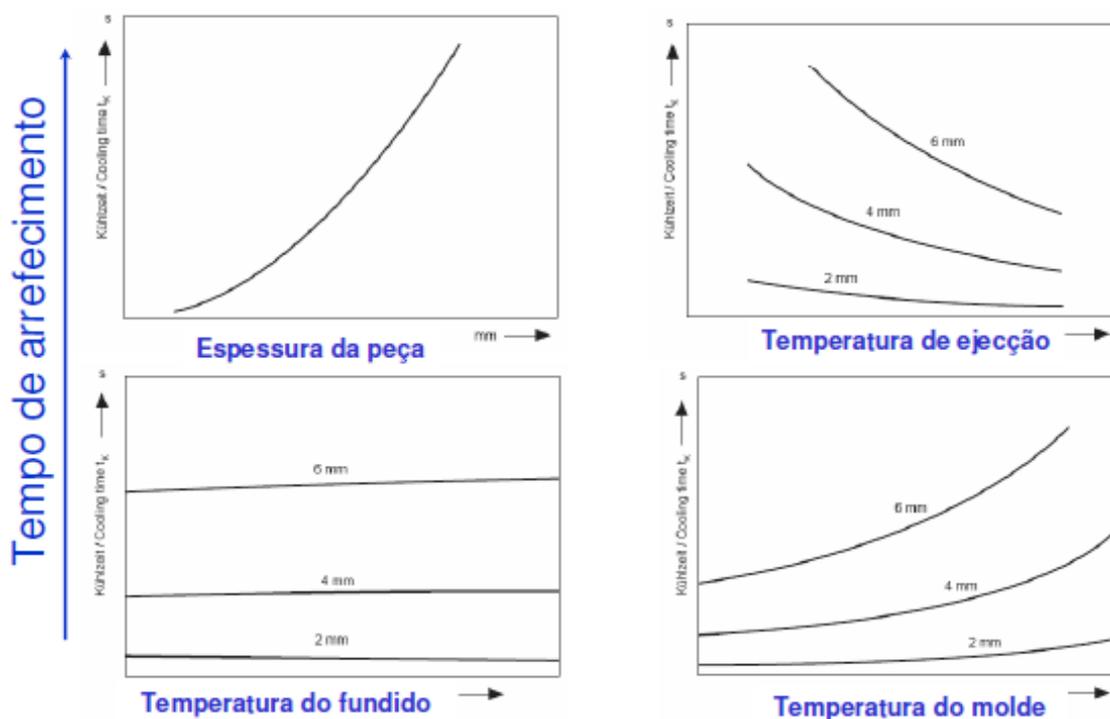


Figura 17 Variação dos diferentes tipos de temperatura e espessura da peça em relação ao tempo de arrefecimento [9].

Trocas de Calor em Regime Transiente:

Equação 10 e Equação 11:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad \longrightarrow \quad \text{Equação da transferência de calor}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \longrightarrow \quad \text{Equação de Fourier}$$

Em que:

Equação 12:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Difusividade Térmica})$$

K – Condutividade térmica

ρ – Densidade

C_p – Calor específico

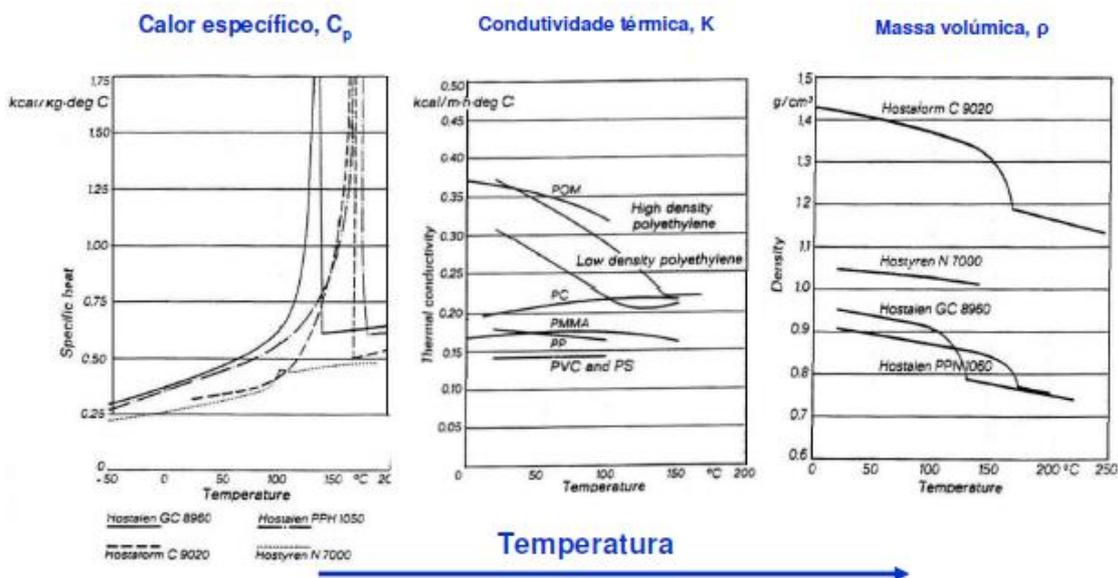


Figura 18 Variação das propriedades físicas com a temperatura [9].

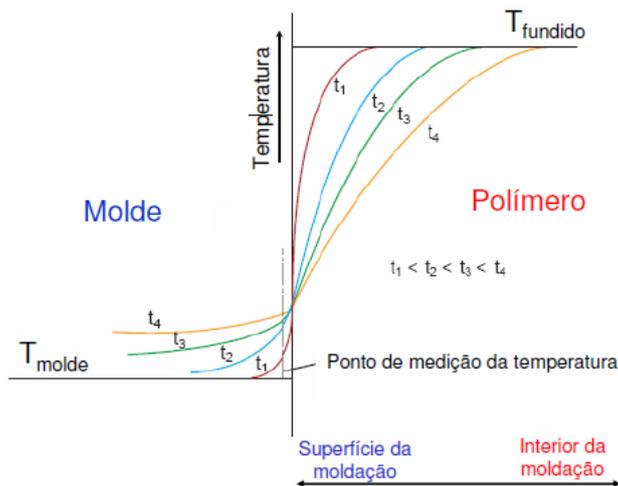


Figura 19 Evolução da temperatura na superfície moldante [9].

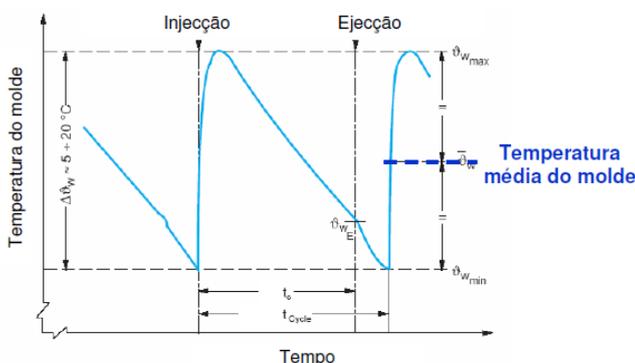


Figura 20 Temperatura média do molde durante o ciclo de injeção [9].

Temperatura na Superfície Moldante:

Equação 13:

$$T_w = 0.5 \times \left(\frac{b_w \cdot T_{min} + b_m \cdot T_m}{b_w + b_m} + T_{min} \right)$$

Equação 14:

$$b_{w,m} = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p}$$

T_{min} - Temperatura mínima do molde

T_m - Temperatura do fundido

b_w - Espessura de penetração térmica do molde

b_m - Espessura de penetração térmica da moldação

Neste caso concreto em estudo, como a condutividade térmica de cada superfície moldante é diferente, vão-se observar valores diferentes nas temperaturas de cada bloco moldante, principalmente nos moldes híbridos com resina epóxida.

Valores típicos para o aço: $b_{aço} = 75.2 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$

Trocas de Calor com o Ambiente:

i) Convecção:

Equação 15:

$$\dot{Q}_{conv} = A_L \cdot \alpha \cdot (\theta_{amb} - \theta_{molde})$$

A_L – Área exposta do molde [m²]

α – Coeficiente de transferência de calor por convecção livre do ar
[15 W/m²·°C]

θ_{amb} e θ_{molde} – Temperatura do meio ambiente e temperatura do molde [°C]

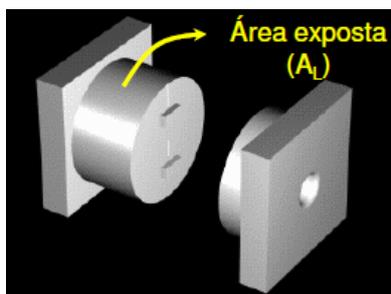


Figura 21 Área exposta do molde [9].

ii) Radiação:

Equação 16:

$$\dot{Q}_{rad} = A_L \cdot \varepsilon \cdot C_{rad} \left[\left(\frac{T_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{molde}}{100} \right)^4 \right]$$

$\varepsilon \sim 0.25$ – Fator de emissão para o aço

C_{rad} – Coeficiente de radiação do corpo negro [5.77 W/m² K⁴]

T_{amb} e T_{molde} – Temperatura absoluta do meio ambiente e do molde
[K= °C+273.18]

iii) Condução:**Equação 17:**

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \cdot \beta (\theta_{amb} - \theta_{molde})$$

A_{fix} – Área de contacto molde - Sistema de fixação [m^2]

θ_{amb} e θ_{molde} – Temperatura do meio ambiente e temperatura do molde [$^{\circ}C$]

β – Fator de proporcionalidade [$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$]

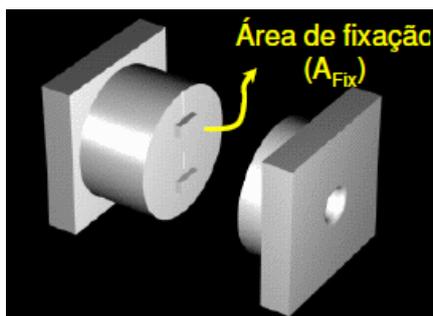


Figura 22 Área de fixação do molde [9].

Calor transferido pelo meio arrefecedor:**Equação 18:**

$$\sum_i \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{PI} = 0$$

como $\dot{Q}_{Amb} < 0$ e $\dot{Q}_{PI} > 0$

Equação 19:

$$\dot{Q}_{TM} = \dot{Q}_{Amb} - \dot{Q}_{PI}$$

Caudal do Fluido arrefecedor:**Equação 20:**

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{TM}}{C \Delta T}$$

C – calor específico do fluido (água: $C=4.186$ kJ/kg $^{\circ}C$)

ΔT – variação da temperatura do fluido (2 a 5 $^{\circ}C$)

Aspetos Térmicos e Mecânicos no design:

Por forma satisfazer as especificações dos moldes híbridos, aspetos térmicos e mecânicos de design terão de ser considerados, nomeadamente, a injeção e contração do material no molde, as dimensões e dimensionamento do sistema de arrefecimento, o layout do canal de alimentação e o sistema de extração [10].

A condutividade térmica reduzida nos compósitos em epoxídicos usados nos moldes híbridos (tabela 1), determinam que os tempos de ciclo das moldações por injeção são mais longos que nos moldes padrão, derivado à baixa taxa de arrefecimento após a injeção [10].

Tabela 1 Propriedades do material na cavidade [10].

Property	P20	Aluminium	Zamak-5	Epoxy Resin
Density [Mg.m^{-3}]	7.80	2.71	6.76	1.75
Specific heat [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	460	782.3	420	1050
Thermal conductivity [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	29	138	109	1
Coefficient of thermal expansion [K^{-1}]	12×10^{-6}	22.5×10^{-6}	27.4×10^{-5}	60×10^{-5}
Young modulus [GPa]	210	70	85	6.86

Um estudo sobre a produção de peças num molde híbrido com 1,5 mm de espessura, em comparação com uma moldação numa cavidade convencional em aço e uma outra com uma cavidade com um compósito epoxídico (figura 23) [10].

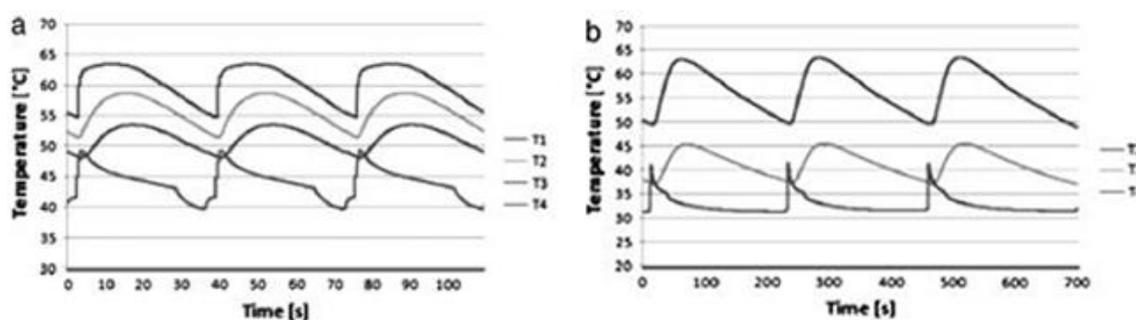


Figura 23 Evolução da temperatura *a)* Numa cavidade em aço *b)* Numa cavidade em SSF/Epoxy [10].

Além disso, características como a temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de deflexão térmica e resistência ao calor são importantes para a capacidade do material do molde. Os compósitos de resina epóxidada têm uma condutividade térmica mais baixa que os metais, que aumentam significativamente o tempo de ciclo de injeção. A baixa condutividade térmica das resinas contribuem para uma maior regime de temperaturas no molde. No entanto, a temperatura que o molde deve tolerar, deve ser mais baixa do que a temperatura de transição vítrea da resina [10].

O processo de arrefecimento nos molde híbridos é o fator chave a considerar no estudo dos moldes híbridos. O objetivo é obter um sistema de arrefecimento correto de forma que as paredes do molde tenham uma temperatura uniforme e uma redução gradual da temperatura do polímero, a fim de encontrar uma solução de compromisso entre a necessidade de reduzir o tempo de ciclo, permitindo a cristalização [10].

A disposição de canais de arrefecimento tem uma grande importância na obtenção de um arrefecimento uniforme, pois ele controla a distribuição da temperatura da superfície de moldação e a evolução durante o período de arrefecimento. Na concepção do design do sistema de arrefecimento, deverão ter-se em conta aspetos como o diâmetro da secção transversal (ou área da secção transversal, se não for circular), a distância entre os canais e a distância entre o canal e a parede do molde [10].

Os principais problemas que surgem ao escolher estas dimensões levam à queda de pressão derivada da escolha do diâmetro e do layout do canal. Uma relação aquecimento/arrefecimento fornece uma orientação geral para o posicionamento dos canais. Recomenda-se que o valor resultante da relação deve ficar entre os 2,5 e 5% para termoplásticos semi-cristalinos e entre 5 e 10% para amorfos [10].

Canais de arrefecimento conformados (figura 24), têm sido utilizados para este fim permitindo a uniformidade do arrefecimento e uma redução significativa do tempo de arrefecimento. Um contro eficaz e uniforme da temperatura do molde através de canais conformados é o primeiro passo para gerir o processo térmico e dinâmico do processo de moldação por injeção para a qualidade e produtividade. Os canais conformados podem ser facilmente produzidos durante a produção do bloco moldante através do processo de RP&T [10].

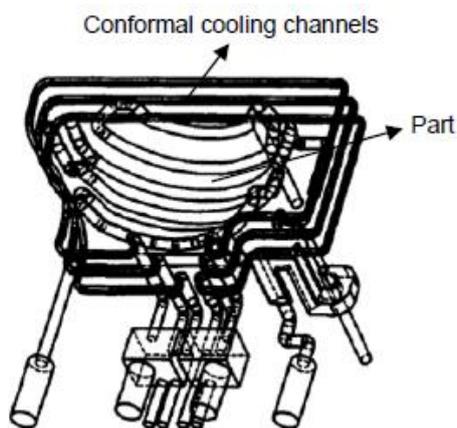


Figura 24 Canais de arrefecimento conformados [10].

A temperatura do molde é regulada pela circulação de um líquido, normalmente água ou óleo que flui nos canais de arrefecimento. A taxa de fluxo determina o regime de circulação do fluido. Pode-se obter uma melhor eficiência no arrefecimento num regime turbulento. Para este fluxo são necessárias altas taxas de fluxo. Num estudo realizado por Voet *et al*, foi mostrada a influência sobre o arrefecimento com regimes de fluido turbulento e laminar, em três diferentes tipos de blocos moldantes, incluindo soluções híbridas [6]. Eles concluíram que, quando a taxa de fluxo aumenta, a capacidade de refrigeração também aumenta. Os mesmos estudos mostram que a utilização de canais de arrefecimento paralelos é benéfica em termos de arrefecimento, como não existe uma pequena queda de pressão no molde. A principal desvantagem desta configuração é a limitação em se conectar todos os circuitos de refrigeração no molde [6].

Outra questão relacionada com os moldes híbridos é a dilatação dos materiais utilizados nas cavidades. Ela pode provocar dificuldades no processo de extração e, portanto, é recomendável que se deva considerar a fase de desenho do molde [11]. Neste estudo, foram utilizados três materiais “leves”: alumínio, Zamak e um compósito epoxídico, por forma a avaliar o potencial interesse para a produção de insertos em RPT [11].

O efeito da utilização de moldes híbridos nas propriedades de peças com espessuras finas, usando várias técnicas RPT, também foi estudado. Foi mostrada a viabilidade da construção de moldes através do processo de fundição para a moldação

por injeção para uma peça em plástico com espessura fina e foram relatados erros mínimos perto da zona do ataque [12].

2.1.5. Molde de Injeção

A conceção e fabrico dos moldes de injeção podem ser considerados os processos mais críticos na moldação por injeção. O desenho do molde tem um grande impacto e na qualidade do produto final. Basicamente, as principais funções de moldes são: dar a forma para a parte polimérica, garantir a reprodutibilidade dimensional de ciclo para ciclo, permitir ao enchimento completo da impressão, refrigeração da parte injetada, e promover a sua expulsão. O molde de injeção deve retirar o calor do material fundido mais rápido e uniforme quanto possível. Portanto, o sistema de refrigeração deve ser concebido de forma precisa. O molde de injeção também deve ser bastante robusto por forma a resistir a ciclos repetidos e altas pressões [13].

O custo do molde pode aumentar devido à sua complexidade e aos tempos de produção rápida necessários. Por esta razão, as ferramentas de simulação e prototipagem rápida e outras ferramentas podem ser utilizadas para diminuir o *time-to-market* e custos de produção [13].

Um molde de injeção é constituído por duas partes, o lado móvel da extração e o lado fixo da injeção, o qual é montado diretamente sobre a placa da máquina de injeção. Na figura 25, podemos ver um esquema das duas placas do molde de injeção [13].

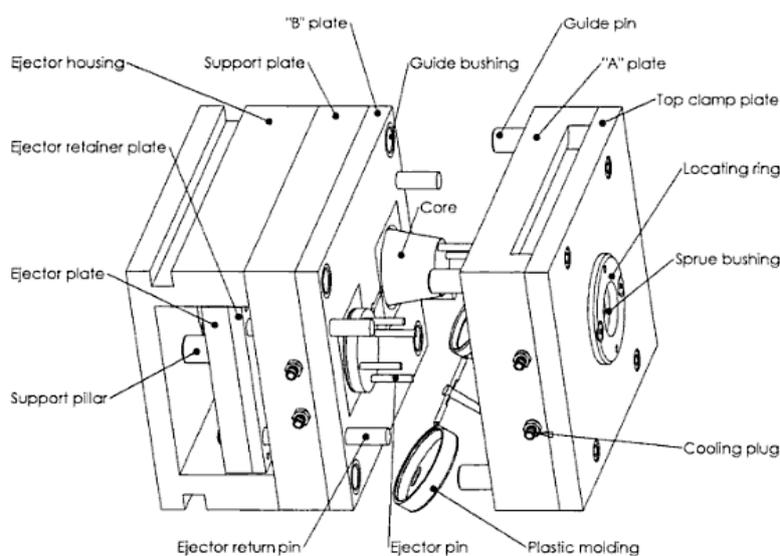


Figura 25 Estrutura de um molde de injeção [14].

A estrutura de um molde de injeção de duas placas consiste em duas partes: o lado da injeção onde está incluído o anel de centragem, sistema de alimentação, o bloco moldante (normalmente a cavidade) e os canais de arrefecimento. No lado da extração, está o bloco moldante (normalmente a bucha), o sistema de extração e os canais de arrefecimento.

As principais especificações para uma máquina de injeção são: obter o máximo de volume de injeção ou montante de fundido que pode ser injetado na moldação, taxa de plasticização, força de fecho, distância entre barras, pressão de injeção máxima. [13]

A força de fecho requerida para um dado molde é calculada através da área projetada de todas as impressões e o sistema de canais, e a máxima pressão de injeção:

Equação 21:

$$F_{max} = A_{max} \cdot p_{max} < F_{clamp}$$

onde F é a força máxima aplicada na impressão, A a área projetada de todas as impressões e do sistema de canais, e p a pressão máxima na impressão. A pressão de injeção depende do material e normalmente tem valores típicos entre os 20 e 100 MPa [13].

2.2. Materiais dos Blocos Moldantes

O compósito para a produção de blocos moldantes é composto por 3 componentes: o elemento termoendurecível (resina epóxidada), o endurecedor e o reforço metálico. As resinas mais utilizadas para este tipo de aplicação são as resinas epóxidada. Têm baixa viscosidade, resistem a altas temperaturas, têm contração reduzida, alta resistência química e alta adesão [13].

A condutividade térmica dos materiais dos blocos moldantes é importante na moldação por injeção. Afeta fortemente o ciclo de injeção e as propriedades finais das peças. A condutividade térmica de um composto da quantidade de enchimento metálico utilizado e na sua distribuição na matriz polimérica. Além disso, a condutividade térmica é fortemente dependente da adesão entre o reforço e o polímero. Uma matriz com partículas maiores pode aumentar a condutividade térmica do compósito, existe uma menor contração com o aumento do tamanho das partículas metálicas, sendo menor com partículas mais pequenas [13].

As resinas epóxicas são resistentes ao calor até atingir a sua temperatura de transição vítrea (140 °C-180 °C). Depois desta temperatura, sofrem uma redução na rigidez [13].

Material de Enchimento

Os materiais de enchimento podem ser utilizados para aumentar as propriedades mecânicas do compósito, para aumentar as propriedades de resposta, como por exemplo, a condutividade térmica e a contração do compósito. Servem também para ocupar volume, diminuindo o custo do composto. Enchimentos metálicos são normalmente utilizados com resina epóxica para produção de materiais compósitos para serem utilizados na Prototipagem Rápida. Os problemas podem surgir a partir de uma mistura não uniforme do epóxico com o agente de cura. A diferença entre a densidade dos materiais de enchimento e da densidade da resina também pode implicar uma mistura não uniforme [13].

A utilização de temperaturas elevadas (160 °C) afeta as propriedades mecânicas do compósito, devido ao amolecimento da resina. Isto promove um diferencial de coeficiente de expansão térmica entre as fases dispersas e a resina epóxica, que conduz a um diferencial de tensões térmicas que podem contribuir para a degradação da qualidade da interface da peça. A adesão entre os materiais de enchimento e a matriz epóxica depende das características geométricas e de afinidade química da superfície. As fibras tendem a aderir mais fortemente à resina do que a partículas em alumínio. Estas são facilmente removidas quando submetidas a pressões elevadas, enquanto as fibras podem aumentar consideravelmente a capacidade de carga, reduzindo o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, o desgaste do compósito [13].

Os reforços metálicos são geralmente misturados com resinas epóxicas, como fibras curtas e/ou pós. Quando são utilizados agentes de enchimento em pó, uma maior densidade de empacotamento é conseguida devido à sua forma. No entanto, as fibras têm uma maior capacidade de transferência de tensão a partir da matriz [13]. As fibras são reforços com um potencial máximo quando têm um comprimento maior do que o comprimento crítico (l_c), determinado pela expressão:

Equação 22:

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau_r}$$

onde σ_f é a resistência à tração da fibra (MPa), d o diâmetro da fibra (mm), τ_r é a tensão de corte da matriz/fibra (MPa). Se o comprimento das fibras for inferior a l_c , não existe transferência de tensões e as fibras não contribuem para a resistência mecânica do compósito [13].

A dispersão das fibras na matriz polimérica é fundamental para determinar as propriedades do compósito, podendo ser orientadas ou aleatórias. Na técnica de moldação a vácuo, as fibras são dispersas aleatoriamente. No entanto, podem ser utilizados campos magnéticos para alinhar as fibras. O alinhamento é essencialmente importante para aumentar a resistência à tração e/ou a condutividade térmica numa dada direção [13].

2.3. Monitorização dos Blocos de Injeção

A monitorização dos moldes de injeção é importante por forma a controlar as variáveis de processamento como a temperatura, pressão e forças envolvidas durante o processo de injeção, que influenciam a qualidade das moldações.

2.3.1. Monitorização da Temperatura

A monitorização da temperatura durante o ciclo de moldação por injeção deve ser efetuada quando é desejável obter peças de plástico com melhor qualidade. As variações de temperatura são causadas por condições físicas tais como as propriedades térmicas do molde e termoplástico, e a temperatura de processamento [13].

Na fase de arrefecimento, o calor é conduzido a partir da massa fundida para o molde. Esta é uma fase crítica durante o ciclo de moldação por injeção, devido à sua grande influência na qualidade e no custo do produto. O arrefecimento do material fundido é difícil pois os plásticos têm uma baixa condutividade térmica. Na fase de injeção, o primeiro material fundido entra em contacto com as paredes do molde e fica congelado e desenvolve-se uma casca na superfície da peça. O gradiente de temperatura durante a fase de arrefecimento conduz a uma morfologia variável ao longo da espessura da peça. Nas camadas da pele, um arrefecimento rápido conduz à orientação das cadeias poliméricas e são maiores do que na zona do núcleo. No núcleo, a velocidade de arrefecimento é mais lenta e promove o desenvolvimento de mais estruturas cristalinas [13].

Nos moldes híbridos, a baixa condutividade térmica dos compósitos de epóxida (cerca de 5% dos metais) geralmente utilizada nos blocos moldante é o

principal problema associado ao processo de transferência de calor. Existe uma resistência térmica mais elevada do compósito epóxida devido à sua condutividade térmica, que implica uma temperatura mais elevada ao longo das peças moldadas, especialmente durante a fase de arrefecimento, quando comparado ao molde convencional. Uma das possibilidades de ultrapassar este problema é a incorporação de um canal de arrefecimento conformado no interior do molde híbrido. Esta solução melhora a eficiência do processo de transferência de calor e contribui para uma temperatura de moldação mais uniforme. A influência do ciclo de injeção das propriedades térmicas dos materiais utilizados nos elementos de moldação em comparação com o aço, é apresentado na figura 26. Existe uma variação de temperatura para diferentes combinações cavidade/bucha dos materiais do mole. Além disso, como seria previsível, o tempo de arrefecimento é mais longo quando os compósitos epóxida (combinação RS (resina/aço)) são utilizados e existe uma diminuição de temperatura mais lenta durante a fase de arrefecimento. Isto implica um maior tempo de arrefecimento e de ciclo.

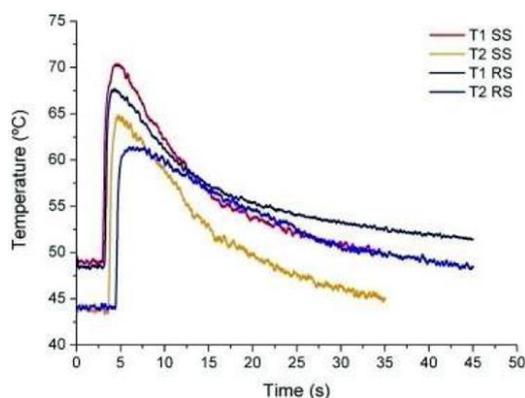


Figura 26 Dados de temperatura para o aço/aço (SS) e resina/aço (RS), nas zonas T1 (cavidade) e T2 (buchas) [13].

Martinho *et al.* 2009 descobriu quando materiais alternativos aos metais são utilizados nos blocos moldantes, a temperatura varia cerca de 40 °C. Para molde convencionais com blocos moldantes em aço, a temperatura varia à volta de 10 °C.

Bareta *et al.* 2007 nos estudos que realizou sobre a incorporação de materiais alternativos nos blocos moldantes, concluiu que a utilização de materiais com diferentes propriedades térmicas implica a necessidade de se ajustar o ciclo de injeção. Como resultado, a morfologia e as propriedades das peças são diferentes, especialmente

quando os materiais semi-cristalinos são utilizados. A figura 27 mostra as temperaturas numa cavidade de um molde híbrido e num molde convencional.

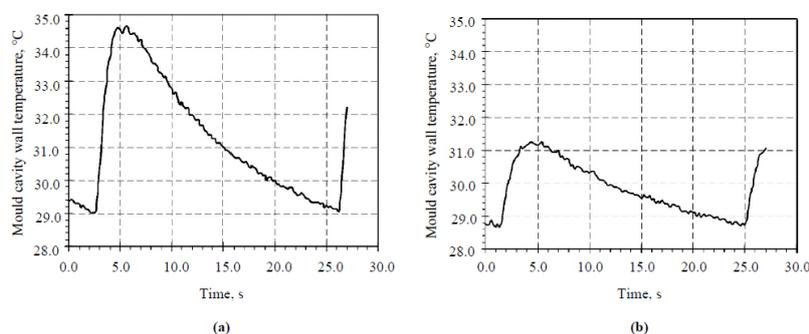


Figura 27 Temperatura na cavidade do molde **a)** molde híbrido **b)** molde convencional [13].

2.3.2. Monitorização da Pressão

A variação da pressão na moldação durante o processo de moldação por injeção deve ser controlada. Através da monitorização da pressão, é possível compensar as variações na viscosidade de fusão e na pressão de injeção por forma a conseguir obter propriedades uniformes na peça.

Pouzada *et al.* 2009 concluiu que a queda de pressão na cavidade do molde é mais lenta quando os materiais alternativos (compósitos epoxidada) são usados e a pressão máxima é sempre inferior ao processo convencional. A pressão de manutenção deve ser reduzida devido às baixas propriedades mecânicas dos materiais alternativos.

Martinho *et al.* 2009, ajustou as condições de processamento de injeção (pressão e tempo de arrefecimento) nos blocos moldantes em epoxidada utilizando em molde híbridos, devido às suas propriedades termomecânicas. A pressão de manutenção foi reduzida em cerca de 60% e o tempo de ciclo foi aumentado em 70%. Os blocos moldantes híbridos levam a uma menor diminuição da pressão do que numa solução em aço (figura 28). A queda de pressão mais baixa na combinação com materiais mais leves (soft tool) é uma consequência da taxa de arrefecimento mais lenta.

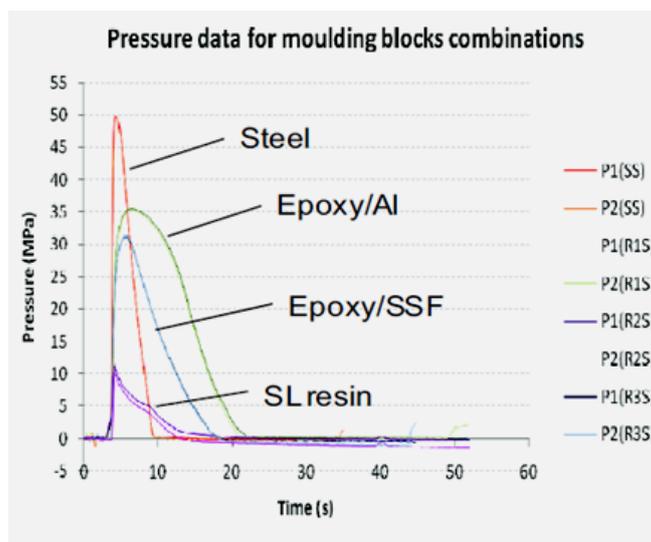


Figura 28 Dados da pressão nas combinações cavidade/bucha; *P1* - Cavidade, *P2* - Bucha [13].

2.4. Vazamento de Resina Epóxidada

No processo de vazamento da resina epóxidada, conhecida como ferramenta epóxidada preenchida em alumínio, é uma ferramenta compósita ou conjunto de ferramentas preenchidas a vácuo que permitem o fabrico de ferramentas leves (soft tool) usando compósitos epoxídicos como enchimento, tais como pó em alumínio. O processo inicia-se com a produção de um padrão que pode ser obtido por prototipagem rápida.

O composto epoxídico é convertido para este padrão e deixa-se curar numa câmara de vácuo para a obtenção de cada parte do molde (figura 29). Devido ao fraco comportamento térmico da resina epóxidada, sistemas de refrigeração reforçados são usados por forma a melhorar a taxa de transferência de calor e, portanto, minimizar o tempo de ciclo [1].

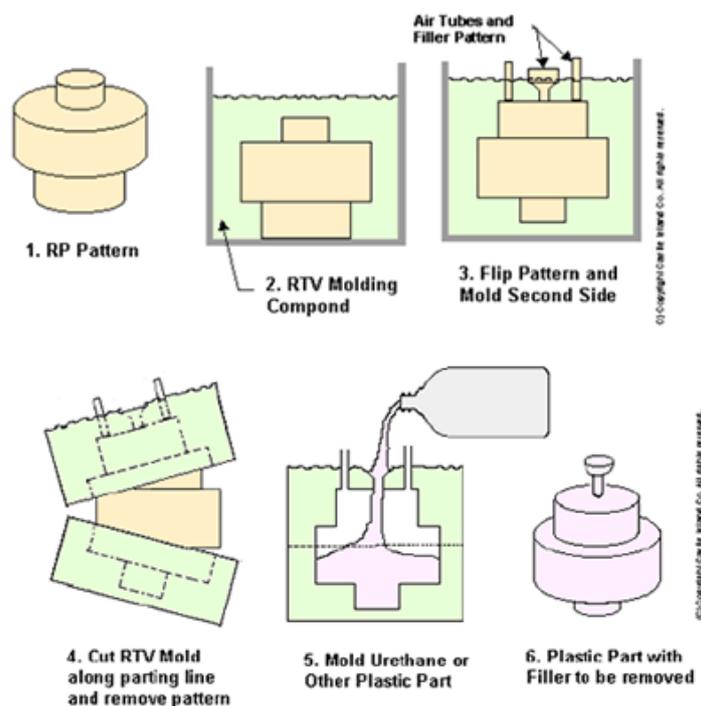


Figura 29 Processo de vazamento de resina [17]

O custo deste processo é tipicamente inferior a 40% do custo das ferramentas convencionais, e os tempos de entrega encontram-se entre as 2 e 4 semanas. A reprodução de pormenores mais detalhados pode ser feita rapidamente, mas ocorrem problemas com maior frequência do que a maquinação convencional, o que pode levar a um trabalho adicional na rebarbação dos blocos moldantes. [1]

Os blocos moldantes (Figura 31) foram produzidos através do vazamento de resina epóxida e sinterização Seletiva por Laser de Metais (SLSm). O molde híbrido foi incorporado com sensores de temperatura e pressão por forma a fazer o monitoramento online e recolha de dados. O padrão base para o vazamento da solução em resina foi feito através do processo de estereolitografia. Após este processo deixa-se curar a resina durante algumas horas a uma temperatura alta (cerca de 70 °C) [1].



Figura 30 Parte frontal de um telemóvel [1]. **Figura 31** Bucha e cavidade produzidas em matriz epoxy [1].

Devido às propriedades térmicas e mecânicas do compósito de resina epóxidada, os parâmetros de processamento são diferentes daqueles utilizados nos moldes convencionais.

Os tempos de ciclo são mais longos, e os ajustes de pressão são mais baixos. As maiores dificuldades em estabelecer uma configuração adequada estão relacionadas com a pressão de injeção, o que não deve ser muito alto para evitar danos dos detalhes principais da peça a injetar [1].

O recurso a vazamento e maquinação de resina epóxidada tem um grave problema ao fim de alguns ciclos de injeção, onde começam a aparecer áreas com indícios de degradação nos blocos moldantes, mais frequentemente nas zonas dos cantos da peça, como por exemplo na figura 32.



Figura 32 Áreas degradadas na bucha feitas pela maquinação da resina epóxidada [1].

Isto deve-se ao desgaste e falha na superfície da peça através de diversos mecanismos, tais como abrasão, erosão, adesão e fadiga da superfície. A abrasão ocorre quando o material é removido ou deslocado através do contacto com uma zona mais complicada ou partículas. As tensões de corte elevadas provenientes do fluxo de fusão podem induzir o desgaste de erosão, especialmente nos engates da peça.

A degradação pode também estar relacionada com uma falha mecânica, caso os detalhes dos blocos de moldação estejam sob alto stress durante a extração. Nesta etapa do ciclo de moldação por injeção, o núcleo é submetido a uma força de contacto resultante do encolhimento de moldação e as forças de atrito resultantes da ação do sistema de extração [1].

2.5. Simulação CAE (Solidworks e MoldFlow)

A indústria de moldes para injeção de materiais termoplásticos está confrontada com a necessidade prioritária de adotar as medidas certas no combate aos custos e tempos desnecessários envolvidos no processo de produção de moldes assim como responder com uma solução cada vez mais integrada. A resposta a este desafio passa, pela utilização crescente de meios computacionais de apoio ao desenvolvimento de produto e à fabricação, por um lado, e pela aposta em ações de inovação, desenvolvimento e formação de nível superior por outro [14].

Está hoje bem claro que para as empresas operarem no fabrico de moldes a chave para o sucesso está intimamente ligada e extremamente dependente da boa prestação desempenhada durante a fase de projeto e desenvolvimento dos novos produtos. A Engenharia e Desenvolvimento de Produto assume assim um papel preponderante na antevisão de potenciais problemas que possam ocorrer durante o funcionamento e no processo de produção, permitindo assim proceder aos ajustes necessários evitando correções e alterações posteriores que seriam bastante mais acentuadas em termos de custos e prazo de produção bem como em falhas na qualidade dos produtos após sua comercialização [14].

Aspetos, como a geometria a adotar, a espessura de peça, os encaixes, os reforços necessários para garantir a estabilidade da peça quando sujeita às solicitações impostas. Estudo complexo permitirá conferir aos componentes em desenvolvimento

um bom desempenho, de acordo com as especificações requisitos impostos para o seu funcionamento [14].



Figura 33 Exemplo de uma simulação no software MoldFlow [15].

Hoje estão disponíveis no mercado inúmeros programas de apoio ao projeto e fabricação que permitem a integração de muitas atividades, como o desenho técnico em 3D, por exemplo o Solidworks, a geração de malhas de elementos finitos, a simulação do processo de injeção, a simulação das operações de maquinação ou a prototipagem rápida. São cada vez mais frequentes os programas que permitem a seleção dos materiais mais adequados e o conhecimento das suas propriedades mais relevantes para as aplicações ou os que permitem fazer a previsão do complexo processo de moldação por injeção, onde um dos programas computacionais mais utilizado é o MoldFlow [14].

3. PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo, iremos caracterizar e descrever todo o processo de fabrico de blocos moldantes para implementação em moldes híbridos no processo de moldação por injeção. Começaremos pela descrição da peça a injetar e material a utilizar neste estudo. Faremos a caracterização das peças injetadas nas diferentes condições de processamento, com os diferentes tipos de blocos moldantes.

3.1. Design da Peça

O primeiro passo para a conceção de produtos em plástico é o desenho da peça. A peça de estudo tem uma geometria simples com: uma forma retangular 2 mm de espessura, um orifício no centro, e com uma aba que faz um ângulo de 120° com a base da peça (figura 34).

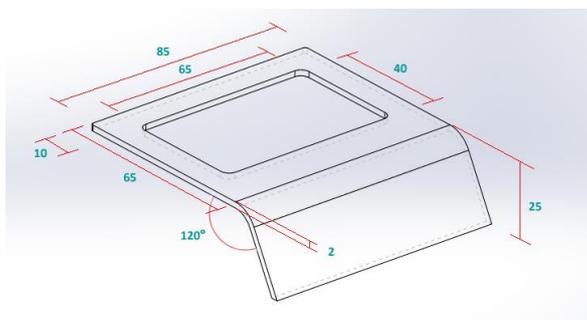


Figura 34 Dimensões gerais da peça a injetar.

3.2. Molde Híbrido

O design do molde híbrido assenta numa estrutura em aço, com um orifício para a colocação do bloco moldante (postiço), conforme mostra a figura 35.

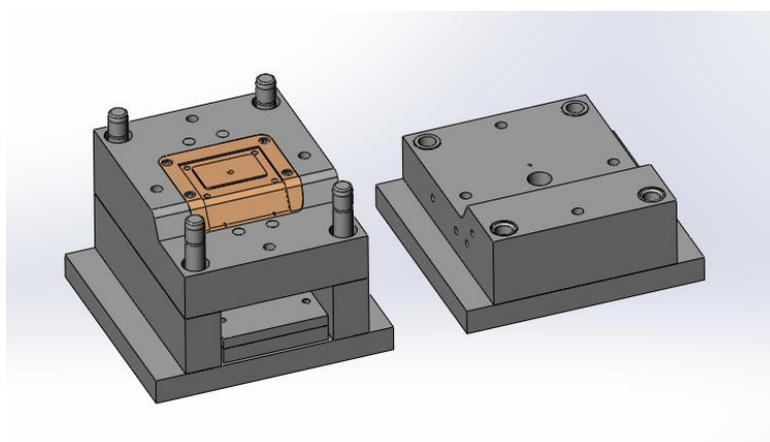


Figura 35 Molde Híbrido (design).

Trata-se de um modelo de molde híbrido que já foi utilizado em outros estudos, tais como a avaliação das propriedades de peças injetadas com polipropileno e nanoargila [16] e novas formas de desenvolvimento de sistemas de arrefecimento através da Prototipagem Rápida [18].

Quanto ao seu interior, podemos verificar que o bloco moldante se encontra inserido na placa das buchas (figura 36), fixo por 4 parafusos. Os pinos do sistema de extração atravessam o interior do por forma a ejetar a peça e também se verifica parte do canal de refrigeração do bloco moldante.

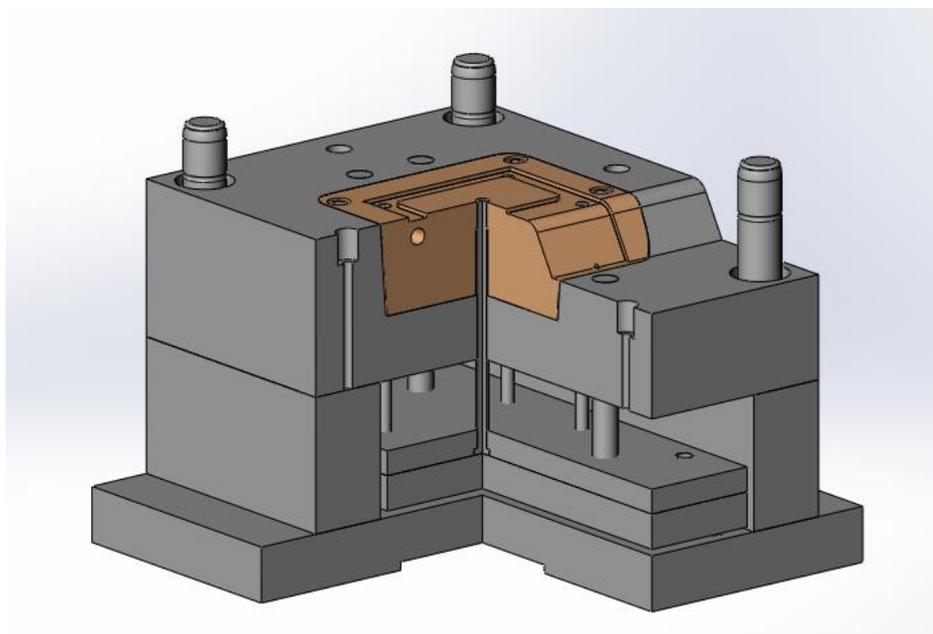


Figura 36 Parte móvel do molde híbrido.



Figura 37 Molde Híbrido.

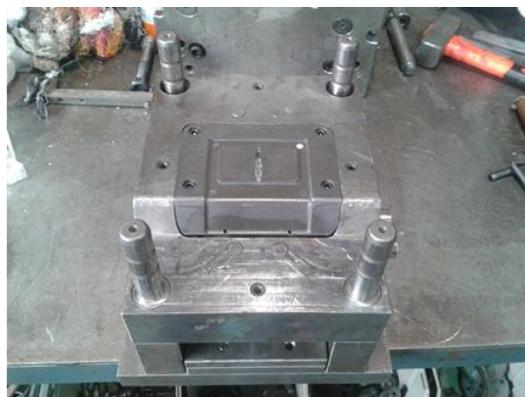


Figura 38 Bloco Moldante na Bucha.

O molde híbrido tem dois tipos de chapas de buchas. A chapa convencional, toda produzida em aço (figura 39), e a outra também fabricada em aço, mas com um orifício, para inserção do postigo (bloco moldante), como podemos observar na figura 40.

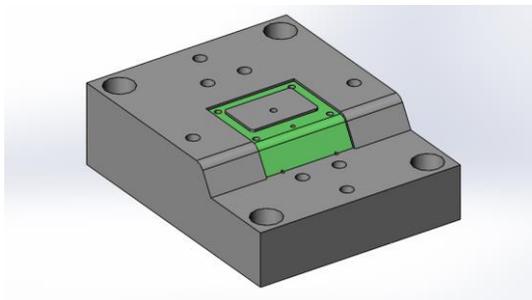


Figura 39 Design da Bucha em aço.

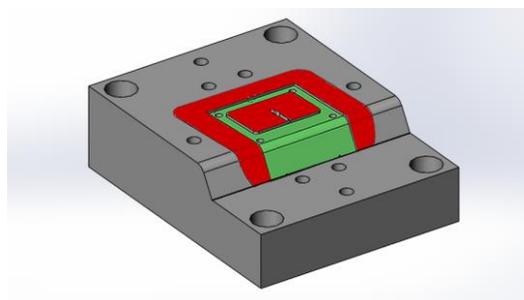


Figura 40 Design da Bucha com postigo.

3.3. Blocos Moldantes

O bloco moldante utilizado para o estudo foi obtido com base num master (modelo padrão), como se pode verificar na figura 41.

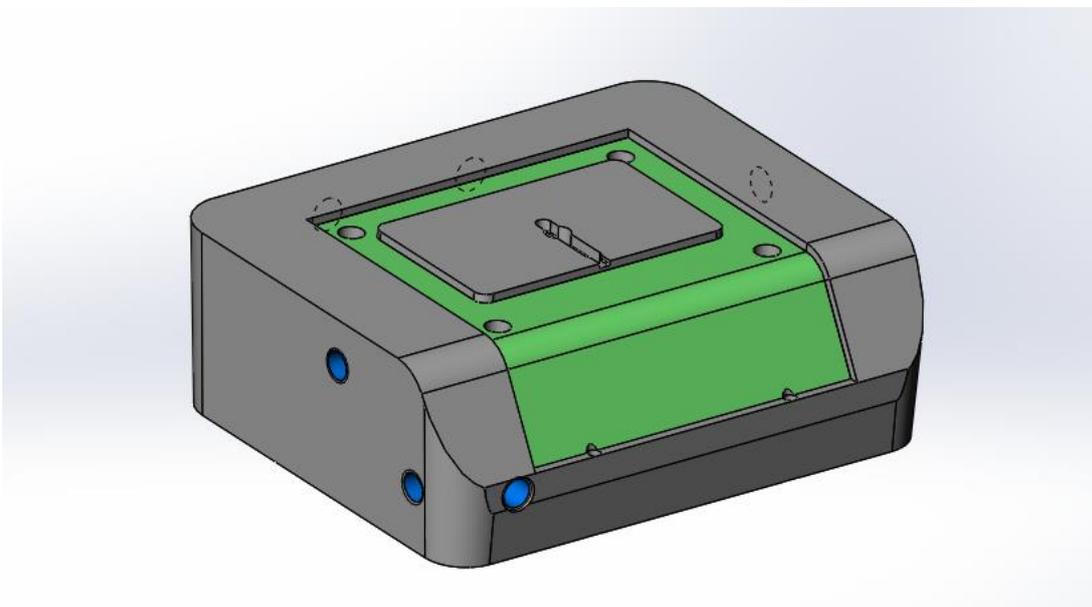


Figura 41 Bloco Moldante (design).

3.3.1. Materiais dos Blocos Moldantes

Nesta secção vamos apresentar as principais características dos materiais utilizados na produção dos blocos moldantes utilizados na chapa das buchas.

3.3.1.1. Molde convencional

A figura 42 mostra o bloco moldante da bucha em aço, ou seja a chapa das buchas produzido por de maquinação convencional.



Figura 42 Bloco Moldante em Aço.

3.3.1.2. Resina epóxida com 60% de pó de alumínio

Para a produção dos blocos moldantes bucha utilizou-se uma resina epóxida, Biresin L74, da empresa Sika (Anexo 1), com 60% em peso de pó de alumínio (Anexo 2). O composto foi produzido através do processo de vazamento de silicone no interior de uma câmara de vácuo. Posteriormente, retirou-se o molde em silicone com a forma do master e procedeu-se ao vazamento da resina epóxida para o interior do molde obtido.

O silicone utilizado para o fabrico do molde na camara de vácuo foi o HB Flex T4 com o endurecedor HB Flex T4-0 da empresa HB Química, Portugal (figura 43-c).



Figura 43 Obtenção do bloco moldante a partir do processo de vazamento de resina na câmara de vácuo – *a)* Master; *b)* Formação do Molde em Silicone; *c)* Molde em Silicone para fazer o vazamento da resina epóxida [16].

Após o vazamento da resina epóxida, submeteu-se o molde em silicone num aparelho de anti-sedimentação (figura 44) por forma a evitar, durante o processo de cura da resina epóxida, que as fibras curtas de aço e o pó de alumínio, devido ao seu peso, se alocassem no fundo da moldação, e assim, obteve-se uma melhor distribuição das fibras na matriz do compósito.



Figura 44 Equipamento de anti-sedimentação.

O resultado final é um bloco moldante, de geometria idêntica ao master, com características mecânicas e térmicas que dependem do material de que é composto (Figura 45).

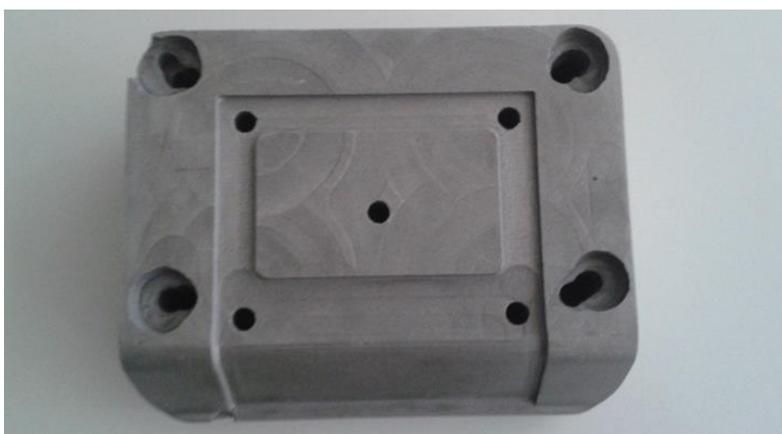


Figura 45 Bloco moldante em 60% de pó de alumínio e resina epóxida.

Posteriormente, maquinou-se o ataque do sistema de alimentação e os furos dos canais de arrefecimento. Utilizou-se um torno mecânico com uma broca M6 (6mm)

(figura 46-a), depois fizeram-se as roscas, com tamanho M10, para tamponar alguns orifícios do sistema de arrefecimento (figura 46-b).

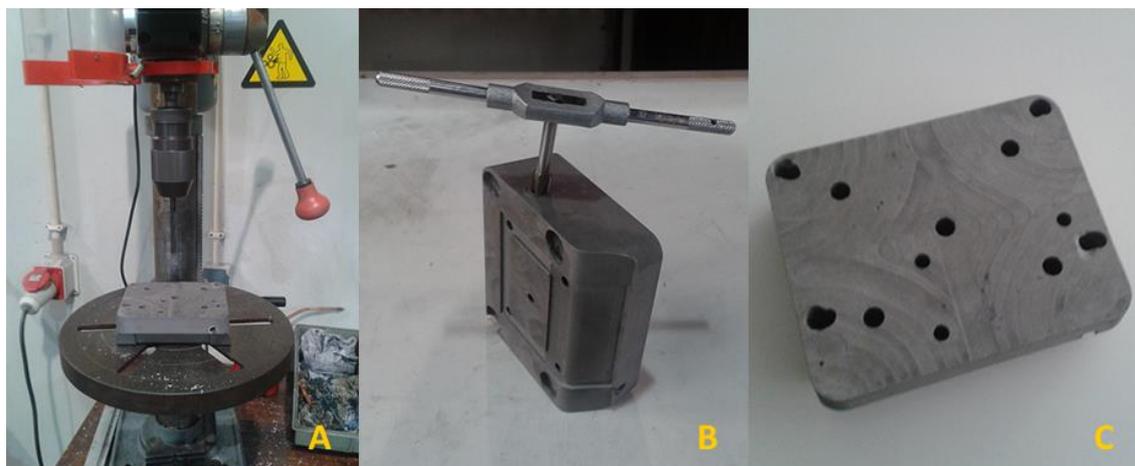


Figura 46 Maquinação do bloco moldante de alumínio – *a)* Torno mecânico para furar os canais de arrefecimento; *b)* Maquinação das roscas laterais com saca-machos M10; *c)* Aspeto das furações no bloco moldante.

A Biresin L74 é uma resina epóxida da empresa Sika, Alemanha. É caracterizada pela sua transparência e baixa viscosidade (viscosidade de mistura a 25 °C: 0,78 Pa.s), permitindo assim uma melhor incorporação por parte das partículas metálicas (fibras curtas de aço e pó de alumínio). O seu rácio máximo em relação ao seu endurecedor, em partes por peso, deverá ser na ordem das 100:17. O tempo de gel é aproximadamente entre os 120 e 150 minutos. O tempo de desamoldação é cerca de 24 horas mais o tempo de cura até que a moldação atinja as propriedades pretendidas. A tabela 2 apresenta as principais propriedades da Biresin L74, e toda a informação sobre a resina epóxida está apresentada no anexo 1.

Tabela 2 Propriedades da Biresin L74 (Anexo 1).

Propriedade	Biresin L74
Massa Volúmica [g/cm^3]	1,1
Dureza [Shore D]	85
Modulo E [MPa]	23000 (GF reinforced)
Resistência à Flexão [MPa]	120
Resistência ao Impacto [KJ/m^2]	17
Temperatura de Distorção ao Calor [$^{\circ}\text{C}$]	160

O Pó de Alumínio (Anexo 2), é um pó atomizado sem revestimento, com um grau de pureza mínima de 99,5 %, e com uma densidade aparente de 1,2 g/cm³. Tem partículas com um tamanho médio de 50 µm e uma gravidade específica de 2,43 Mg.m⁻³ [13].

Tabela 3 Propriedades do composto Biresin L74 com o Pó de Alumínio [13].

Propriedade	Biresin L74 + 60% Pó de Alumínio
Coefficiente de Expansão Térmica [K ⁻¹]	6.00×10 ⁻⁵
Módulo de Flexão (20°C) [GPa]	5-6
Calor Específico [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1279.19
Condutividade Térmica [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0.606
Difusividade Térmica [m ² .s ⁻¹]	0.286×10 ⁻⁶
Massa Volúmica [g/cm ³]	1.65

Os moldes em silicone são geralmente usados no vazamento de resina epóxida, permitindo a produção rápida de blocos moldantes com excelente acabamento superficial. No caso em estudo, foi utilizado um “master” em resina epóxida, produzido através do processo de maquinação convencional (figura 47). Para a produção do molde (figura 43-c), o silicone utilizado foi o HB Flex T4 com o endurecedor HB Flex T4-0 da empresa HB Química, Portugal (Anexo 3). A mistura elaborada foi de 110 partes de silicone para 10 partes de endurecedor em peso, tendo em conta as normas fornecidas pelo fabricante. Todos os dados referentes ao silicone encontram-se no Anexo 5.



Figura 47 Master maquinado em Resina epóxida.

3.3.1.3. 15% Fibra Curta de Aço com Resina Epóxida

Para a produção do compósito do bloco moldante com fibras curtas de aço, utilizou-se um composto de resina epóxida Biresin L74 da empresa Sika (Anexo 1), preenchida com 15% de fibra curta de aço.

O composto foi produzido através do processo de vazamento de silicone no interior de uma câmara de vácuo, tal como aconteceu com o fabrico do bloco moldante com a carga em pó de alumínio.

Procedeu-se à mistura das fibras curtas de aço (figura 48-a) com a resina epóxida, posteriormente fez-se o vazamento para o interior do molde em silicone (figura 48-b) e por fim, utilizou-se o aparelho de anti-sedimentação (figura 48-c), para que as fibras curtas de aço se distribuam uniformemente.



Figura 48 Obtenção do bloco moldante com 15% de fibra curta de aço com resina a partir do processo de vazamento de resina na câmara de vácuo – *a*) Compósito de resina epóxida com fibra curta de aço; *b*) Vazamento do compósito para o molde de silicone; *c*) Máquina anti-sedimentação [16].

Após a obtenção do bloco moldante com fibra curta de aço maquinou-se o sistema de alimentação e fizeram-se algumas retificações utilizando a resina epóxida, nomeadamente o preenchimento de orifícios desnecessários, e posteriormente inseriu-se cianoacrilato e fita de alumínio para garantir uma melhor vedação (Figura 49).



Figura 49 Bloco moldante com 15% em peso de fibra curta de aço e resina epóxida.

3.3.2. Processo de Vazamento de Resina Epóxida

O processo de vazamento de resina epóxida por vácuo foi o utilizado na produção dos blocos moldantes. Os principais passos do processo de vazamento de resina são:

- Preparação da estrutura para o vazamento da resina epóxida, que normalmente é um molde em silicone;

- Mistura do composto: os componentes da mistura são pesados nas proporções adequadas, e de acordo com as especificações do fabricante, agitando-se manualmente numa primeira fase e através de um processo automático (misturadora) na fase seguinte;

- Vazamento do composto: após a sua homogeneização na misturadora, o composto é vazado para o interior da estrutura em silicone. Este vazamento ocorre no interior de uma máquina de vácuo por forma a evitar a ocorrência de bolhas de ar na mistura do composto:

- Cura: é realizada à temperatura ambiente durante um período de 24 horas, para o caso da resina epóxida utilizada;

- Extração: é feita depois da cura do bloco moldante;

- Pós-Cura: é efetuada num forno através de um programa de temperatura controlada e conforme indicação do fabricante. Para a resina epóxida utilizada o programa de temperatura utilizado na pós-cura foi:

- 1 – Aquecimento até 60 °C, a uma taxa de 10 °C/hora e manter nos 60 °C durante 3 horas;

- 2 – Aquecimento até 140 °C, a uma taxa de 10 °C/hora e manter nos 140 °C durante 3 horas;

- 3 – Arrefecimento a temperatura a uma taxa de 10 °C/hora até atingir a temperatura do ambiente;

3.3.3. Equipamentos para o processo de Vazamento de Resina Epóxida

Para a produção de moldes através do processo de vazamento de resina utilizaram-se os seguintes equipamentos: misturador, câmara de vácuo, o forno e o aparelho de anti-sedimentação.

Utilizou-se o misturador (figura 50-a) para misturar a resina epóxida com as partículas metálicas (pó de alumínio e fibras curtas de aço) em vácuo, por forma a promover uma mistura homogénea.

A câmara de vácuo (figura 50-b) foi utilizada para minimizar as bolhas de ar oriundas do processo de mistura.

Para evitar a sedimentação das cargas metálicas e promover uma mistura das cargas metálicas mais homogénea, derivado da diferença de densidade entre as cargas metálicas e a resina epóxida, utilizou-se um aparelho de anti-sedimentação (figura 50-c), que mantém a rotação do interior da moldação, até esta atingir uma determinada viscosidade, tipicamente a do ponto de gelificação.

Por fim utilizou-se um forno (figura 50-d) para a pós-cura do compósito de resina epóxida com as cargas metálicas (pó de alumínio e fibras curtas de aço). O forno utilizado (Eurotherm, Type 3614 Thermal Controller (UK)), tem um programa de controlo de temperatura com capacidade de 4 etapas para diferentes temperaturas, taxas de aquecimento e tempo para cada etapa.



Figura 50 Equipamentos utilizados no processo de vazamento de resina epóxida – *a*) Misturadora; *b*) Câmara de Vácuo; *c*) Equipamento de Anti-Sedimentação; *d*) Forno.

3.4. Material de Injeção

O material utilizado na injeção das peças nos 3 blocos moldantes foi o Polipropileno com a referência *TOTAL CHEMICALS PPH 5060*. A ficha técnica do material encontra-se no Anexo 4.

3.5. Máquina de Injeção

A máquina de injeção utilizada foi a FERROMATIK MILAKRON K85-S (figura 51) com uma capacidade de força de fecho até 85 toneladas. A ficha técnica encontra-se no Anexo 5.



Figura 51 Máquina de Injeção FERROMATIK MILAKRON K85-S.

3.6. Condições de Processamento

As condições de processamento utilizadas para o estudo tiveram em conta a variação de duas variáveis de processamento: a temperatura de injeção do fundido e a temperatura do molde. Para temperatura de injeção foram utilizados os valores de 200 °C, 225 °C e 250 °C e para a temperatura do molde os valores de 20 °C, 40 °C e 60 °C. Intercalando os diversos valores, foram formadas 9 condições para o estudo, como mostra a tabela 4.

Tabela 4 Condições de Processamento utilizadas.

Condição	$T_{injeção}$ (°C)	T_{molde} (°C)
A		20
B	200	40
C		60
D		20
E	225	40
F		60
G		20
H	250	40
I		60

O perfil de temperaturas do cilindro de injeção (tabela 5) utilizado na máquina de injeção foi o apresentado na tabela 5.

Tabela 5 Perfil de temperaturas do cilindro de injeção da injetora.

$T_{injeção}$ (°C)	Zona 5 (°C)	Zona 4 (°C)	Zona 3 (°C)	Zona 2 (°C)	Zona 1 (°C)
200	200	190	180	160	140
225	225	200	180	160	140
250	250	230	210	170	160

3.6.1. Condições de processamento dos blocos moldantes na injetora

Conforme apresentado na tabela 4, e tendo em conta que cada bloco moldante apresenta características diferentes, nomeadamente no que diz respeito à condutividade térmica, ajustaram-se as variáveis de processamento nas condições de A até I. Outras variáveis de processamento como a pressão de injeção (PI), a velocidade de injeção (vI), o tempo de injeção (tI) e a almofada (sI), tiveram de ser ajustadas à medida que se aumentava a temperatura de injeção, pelo que a pressão de injeção diminuía à medida que se aumentava a temperatura de injeção, bem como a velocidade de injeção, para que não se verificasse a degradação térmica do material na impressão final da peça.

O tempo de arrefecimento (t_{arref}) aumentou nos blocos moldante com material compósito devido à sua condutividade térmica ser menor do que no bloco moldante 100% em aço.

3.6.1.1. Bloco Moldante em Aço

As variáveis de processamento utilizadas no bloco moldante em aço foram iguais para todas as condições de processamento, tal como podemos observar na tabela 6.

Tabela 6 Condições de Processamento do bloco moldante em aço.

Condição	P1 (bar)	v1 (mm/s)	t1 (s)	s1 (mm)	P2 (bar)	v2 (mm/s)	t2 (s)	s2 (mm)	t_{arref} (s)
A (200,20)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
B (200,40)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
C (200,60)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
D (225,20)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
E (225,40)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
F (225,60)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
G (250,20)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
H (250,40)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20
I (250,60)	60	30	0,86	9	45	30	8	9,30	20

3.6.1.2. Bloco Moldante com 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida

No bloco moldante com 15% de fibra curta de aço diminui-se significativamente o valor da velocidade de injeção e da pressão de injeção (tabela 7) nas condições de processamento com temperaturas de injeção mais elevadas (225 °C e 250 °C), pelo fato de haver degradação térmica na peça injetada (figura 52).

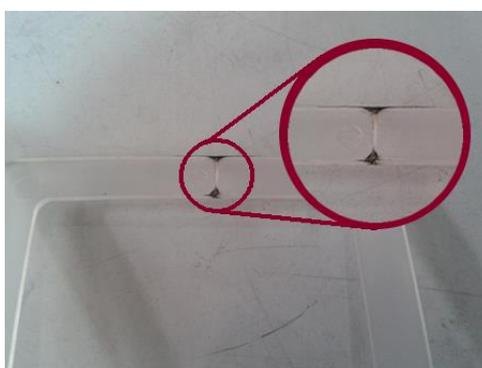


Figura 52 Degradação térmica numa peça injetada.

Tabela 7 Condições de Processamento do bloco moldante com 15% em fibra curta de aço e 85% resina epóxida.

Condição	P1 (bar)	v1 (mm/s)	t1 (s)	s1 (mm)	P2 (bar)	v2 (mm/s)	t2 (s)	s2 (mm)	t _{arref} (s)
A (200,20)	53	30	1,10	13	45	30	8	10,30	30
B (200,40)	56	30	0,98	12	45	30	9	10,30	30
C (200,60)	57	20	1,14	12	45	30	9	10,30	30
D (225,20)	53	30	1,10	13	45	30	8	10,30	30
E (225,40)	30	5	1,97	21	45	30	9	10,70	30
F (225,60)	18	4	1,92	23	45	30	9	9,50	30
G (250,20)	23	8	1,29	21	35	30	9	11,40	30
H (250,40)	17	4	1,98	23	35	30	9	11,20	30
I (250,60)	7	2	1,88	27	35	30	9	10,80	30

3.6.1.3. Bloco Moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida

Tal como no bloco moldante com fibra curta de aço, no composto de alumínio com resina epóxida também nas condições de processamento com temperaturas mais elevadas se diminuiu o valor da velocidade e da pressão de injeção (tabela 8). Nas condições de processamento finais (F, G, H e I), teve ainda que se diminuir a velocidade dos extratores uma vez que com o impacto destes as peças injetadas partiam.

Tabela 8 Condições de Processamento do bloco moldante com 60% pó de alumínio e 40% resina epóxida.

Condição	P1 (bar)	v1 (mm/s)	t1 (s)	s1 (mm)	P2 (bar)	v2 (mm/s)	t2 (s)	s2 (mm)	t _{arref} (s)
A (200,20)	39	30	1,88	12	30	30	5	12,10	30
B (200,40)	39	30	1,88	12	30	30	5	12,10	30
C (200,60)	39	30	1,88	12	30	30	5	12,10	30
D (225,20)	39	30	1,88	12	30	30	5	12,10	30
E (225,40)	39	30	1,88	12	30	30	5	12,10	30
F (225,60)	80	10	1,15	12	30	50	5	12,70	50
G (250,20)	30	6	1,29	10	30	30	6	11,40	50
H (250,40)	14	4	1,95	23	30	30	5	12,80	50
I (250,60)	13	4	1,97	23	30	30	5	12,50	50

3.7. Sistemas Funcionais do Molde

Neste capítulo iremos descrever os sistemas funcionais do molde.

3.7.1. Sistema de Extração

O sistema de extração do molde permite a extração da peça. Um *design* adequado para este tipo de sistema é muito importante por forma a não causar danos na peça. No caso dos dois tipos de moldes utilizados (convencional (figura 53) e híbrido (figura 54)), o sistema de extração é o mesmo, variando apenas o *design* das chapas das buchas.

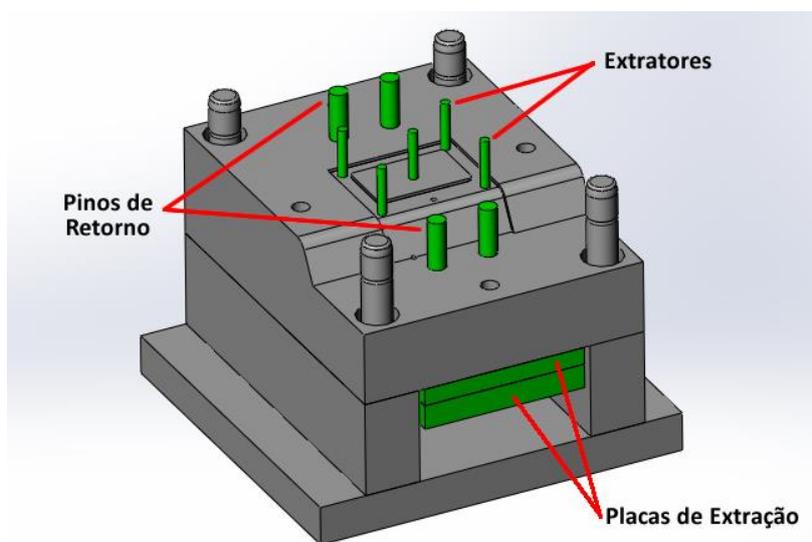


Figura 53 Sistema de Extração do Molde Convencional.

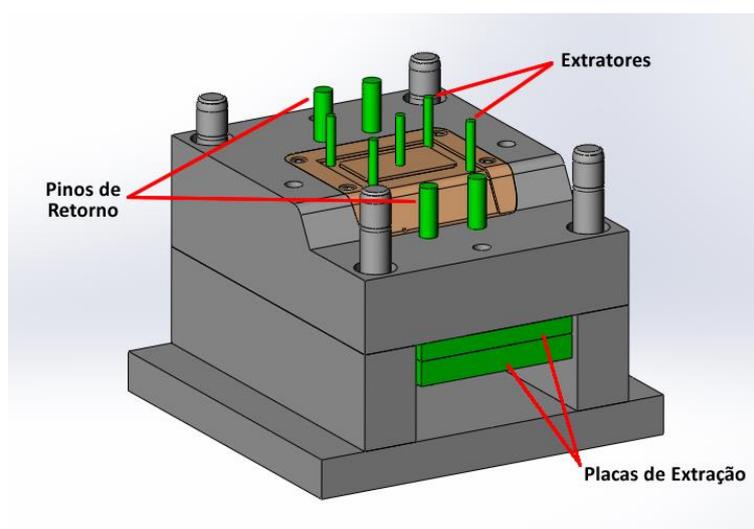


Figura 54 Sistema de Extração do Molde Híbrido.

O comprimento dos extratores deve ter em conta a garantia de extrair a peça sem a danificar. No caso do molde em estudo, o avanço máximo das placas de extração é de 37 mm.

3.7.2. Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação do molde é constituído por um canal de entrada direta, por onde é transportado o polímero fundido, desde o cilindro de injeção até ao bloco moldante. O ataque no bloco moldante está localizado perto do centro da peça, por forma a se obter um enchimento uniforme e eficaz ao longo de toda a impressão (figura 55).

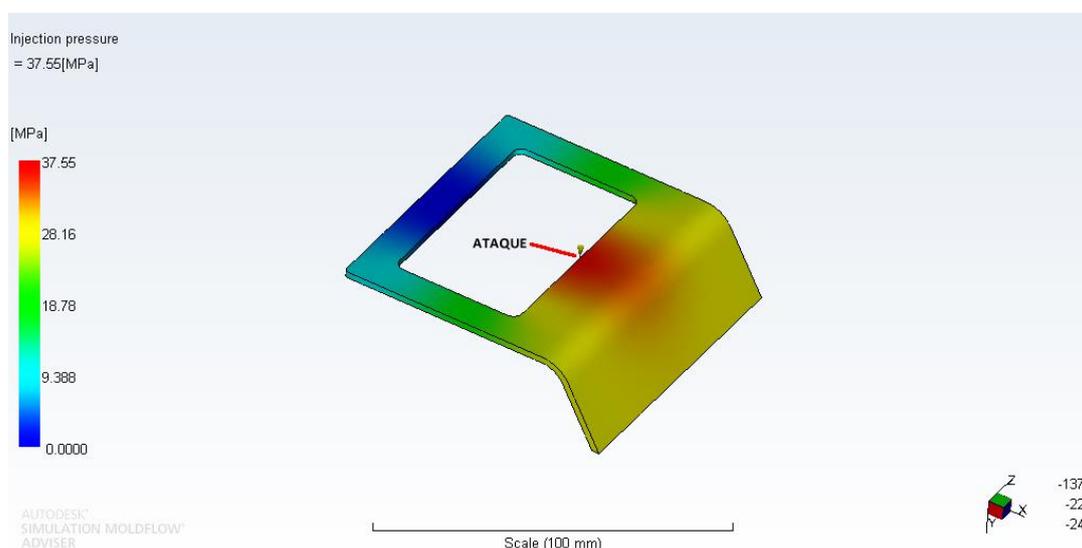


Figura 55 Localização do ponto do ataque da peça.

Como a placa da cavidade utilizada é a mesma nos dois modelos de molde, o sistema de alimentação está localizado no lado da placa fixa (cavidade).

Como o ponto de ataque está localizado numa das partes do orifício central, significa que ao preencher a impressão, do outro lado se formará uma linha de junção, conhecida como linha de soldadura, e será o ponto mais crítico e frágil da peça (figura 56). Também esta zona é alvo de estudo no nosso trabalho, dependendo das condições de processamento e dos blocos moldantes utilizados.

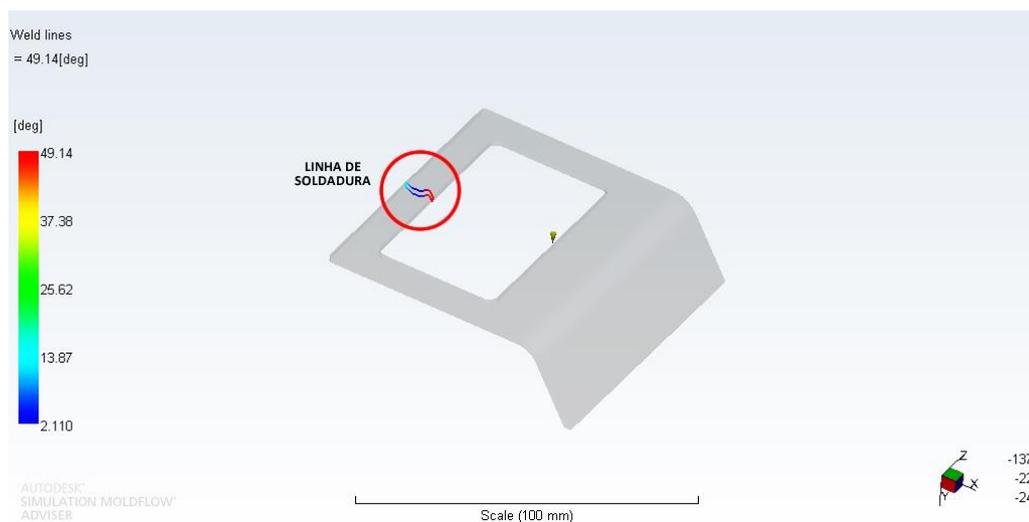


Figura 56 Localização da linha de soldadura.

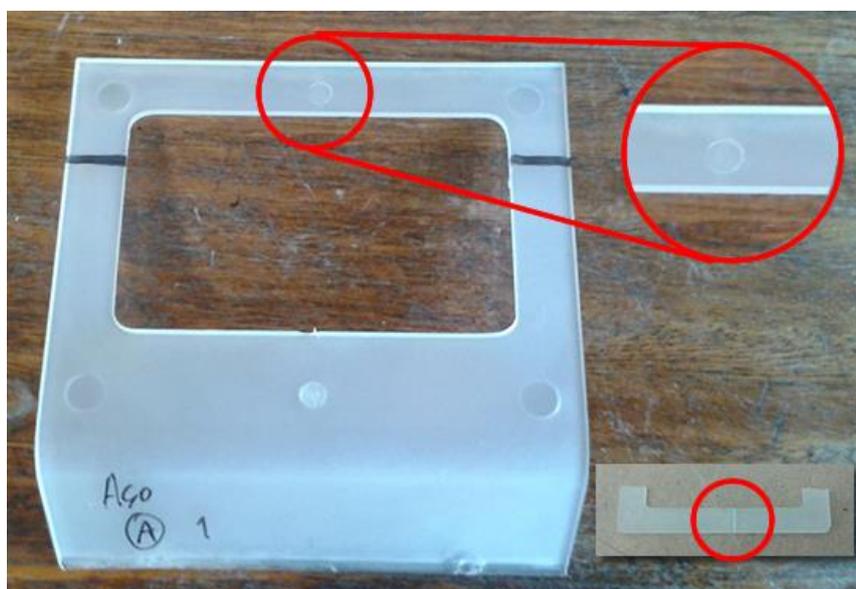


Figura 57 Localização da linha de soldadura nas peças injetadas.

Para se avaliar o enchimento da impressão utilizou-se o software de simulação *Autodesk Simulation MoldFlow 2013 Adviser* (figura 58).

A simulação permitiu-nos avaliar, por exemplo, se a moldação é devidamente preenchida com os valores das variáveis de processamento estabelecidos (temperatura de injeção, temperatura do molde, velocidade de injeção, etc), os tempos de enchimento, a distribuição de temperaturas na peça, os tempos de arrefecimento, etc. A figura 60 exemplifica o caso do tempo de enchimento.

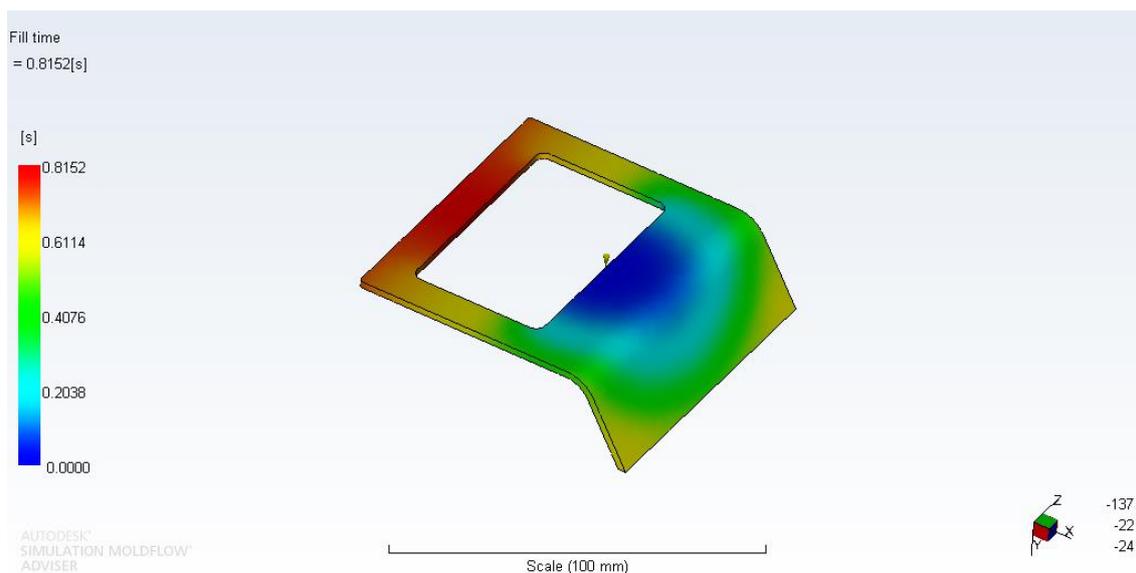


Figura 58 Exemplo de uma simulação do tempo de injeção do PPH 5060 com temperatura de injeção (200 °C) e temperatura do molde (20 °C).

3.7.3. Sistema de Controlo de Temperatura

O sistema de controlo de temperatura ou sistema de arrefecimento, promove o arrefecimento controlado do material injetado no bloco moldante, por forma a não causar danos na peça. Os canais de refrigeração estão localizados em ambos os lados das placas de injeção e de extração, a uma distância idêntica. No caso da placa fixa, a placa da cavidade, o sistema de arrefecimento é idêntico para todos os blocos moldantes (figura 59).

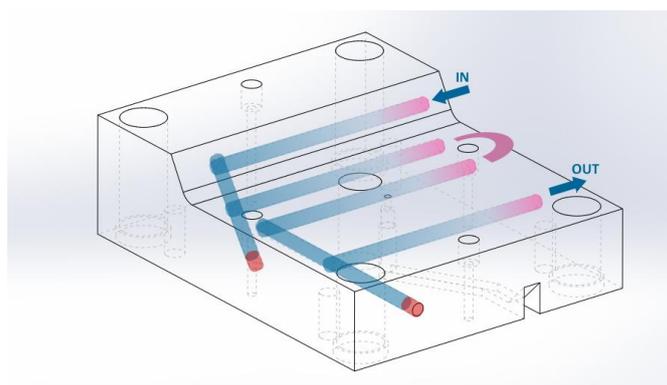


Figura 59 Sistema de arrefecimento da placa da cavidade.

No que diz respeito à parte da bucha, o sistema de arrefecimento da placa em aço tem um *design* ligeiramente diferente do dos blocos moldantes dos moldes híbridos.

No caso da placa em aço, trata-se de um sistema maquinado com 4 canais ligados entre si, com comprimentos iguais à largura da placa da bucha (figura 60).

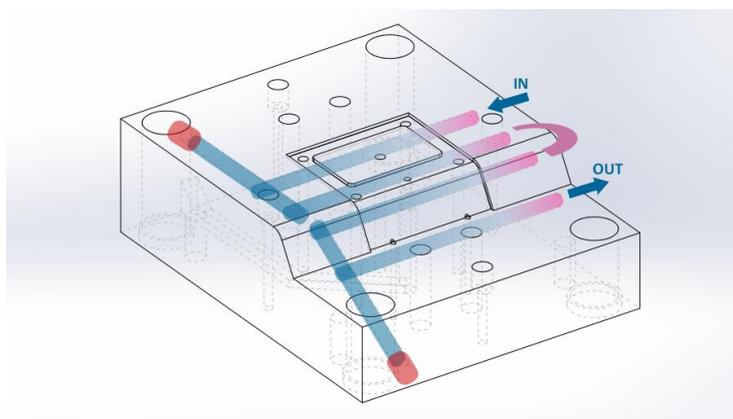


Figura 60 Sistema de arrefecimento da placa da bucha

Em relação aos blocos moldantes compostos com o pó de alumínio e resina epóxida e os de 15% de fibra curta de aço com resina, o sistema de canais de arrefecimento varia no *design*, fruto da incorporação do bloco moldante no interior da placa em aço, e por forma a vedar eficazmente o fluido de refrigeração (água), tem apenas uma entrada e uma saída, por baixo do bloco moldante (postigo), vedada com 2 o-rings (figura 61).

Como se trata de uma maquinação no interior do bloco moldante híbrido e não se tratam de canais conformados, o *layout* do sistema de arrefecimento do da placa da bucha em aço, pelo que existirão variações notáveis na zona interna das peças, com variações de percentagem nas cascas.

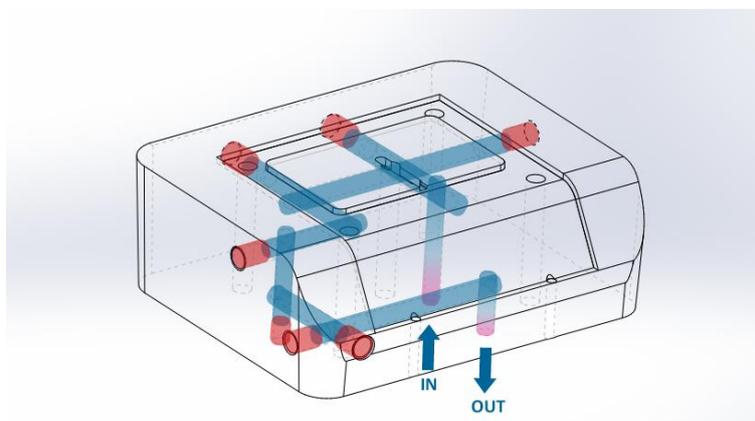


Figura 61 Sistema de arrefecimento do bloco moldante híbrido

3.7.4. Sistema de Guiamento e Centragem

O sistema de guiamento e centragem de um molde é desenvolvido para a unir as duas metades do molde de forma correta na máquina de injeção. Este tipo de sistema, normalmente, é constituído por um anel de centragem e 4 pinos laterais que servem de guias para o molde unir as duas metades (figura 62).

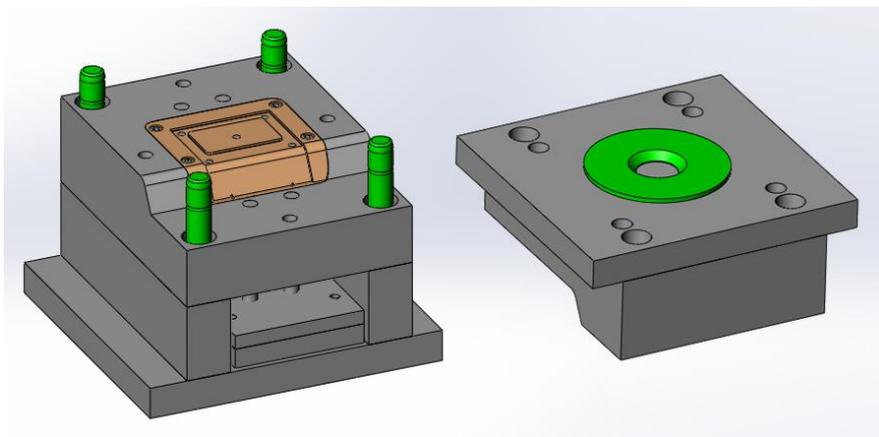


Figura 62 Sistema de guiamento e centragem do molde.

3.8. Caracterização das peças injetadas nos Blocos Moldantes

Os blocos moldantes são a parte mais importante do molde de injeção, pois definem a forma da peça e as principais propriedades pretendidas. É então necessária uma rigorosa caracterização mecânica e microscópica das peças injetadas em cada tipo de bloco moldante, por forma verificar a qualidade da reprodução das peças no processo de moldação por injeção.

3.8.1. Caracterização Mecânica

Determinaram-se algumas propriedades mecânicas dos materiais compósitos em resina epóxidada, nomeadamente o módulo de elasticidade e a tensão de cedência. Foram efetuados testes nos três tipos de blocos moldantes, o de aço, o de 60% pó de alumínio + resina epóxidada e o de 15% fibra curta de aço + resina epóxidada.

Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados na máquina de ensaios universal Zwick/Roell Z005 (figura 63) a uma velocidade de 5 mm/min, com uma carga de 5 KN e uma distância entre amarras de 55 mm. Colocaram-se as dimensões dos provetes

(largura de 10 mm e espessura de 2 mm) no software da máquina. Para cada tipo de bloco moldante, foram realizados 7 ensaios de tração, dos quais escolhemos os 5 com os resultados mais aproximados, tendo em conta o desvio-padrão.

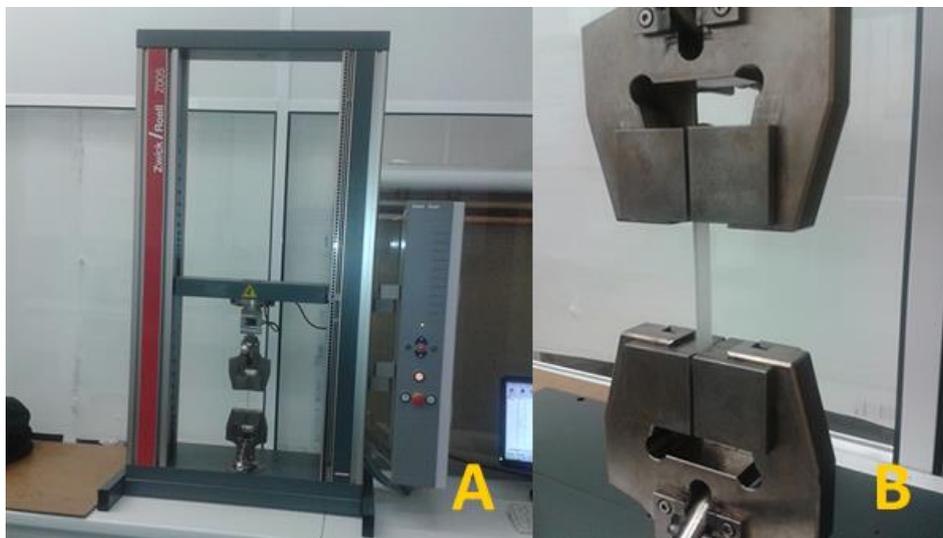


Figura 63 Ensaio de tração na máquina de ensaios Zwick/Roell Z005 – *a)* Vista geral da máquina; *b)* Vista pormenorizada do provete para o ensaio de tração.

Os cortes dos provetes foram efetuados na máquina de serra de fita DeWalt (figura 64).



Figura 64 Serra de fita DeWalt.

Os provetes para os ensaios foram retirados da peça injetada, mais propriamente na zona da linha de soldadura (figura 65). Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (aproximadamente 23 °C).

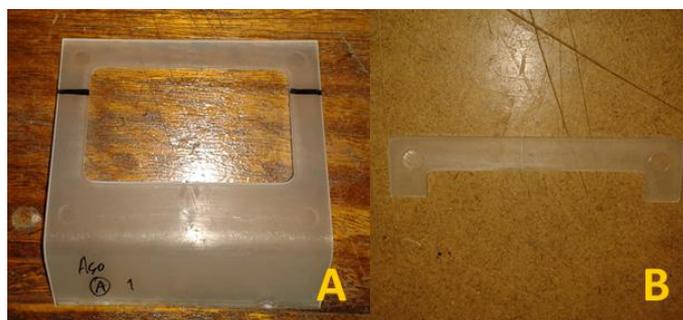


Figura 65 Corte do provete de ensaio – *a)* Vista geral da peça injetada; *b)* Provete cortado para o ensaio de tração.

3.8.2. Caracterização do material injetado nos Blocos Moldantes

Por forma a efetuar o controlo de qualidade das peças injetadas, fez-se o estudo da zona da casca. Foi utilizado um microscópio de transmissão Olympus (figura 66-d), acoplado com uma máquina digital Leica e o software LAS (Programa de Análise de Imagem).

Para a preparação das amostras, fez-se um corte na zona da linha de soldadura através da máquina de corte com uma lâmina de vidro (figura 66-a), e colocaram-se entre duas lamelas de vidro, com bálsamo do Canadá, sendo utilizado neste tipo de análise por causa do seu índice de refração ser idêntico ao do vidro, podendo-se visualizar no microscópio sem influências na imagem.

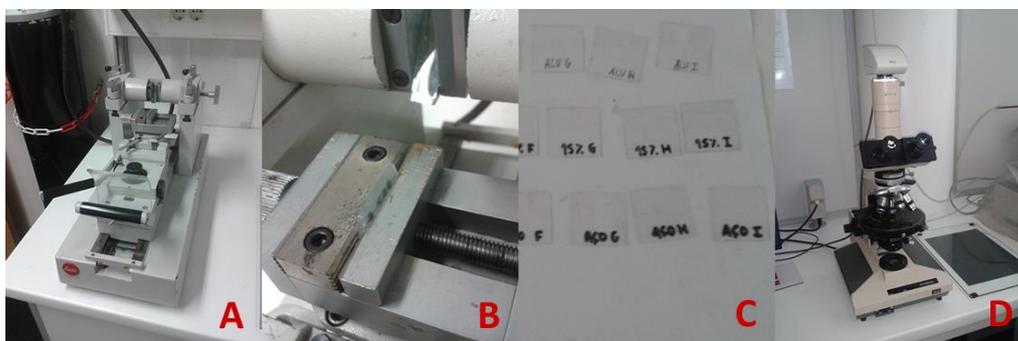


Figura 66 Preparação das amostras para a microscopia – *a)* Máquina de corte de amostras; *b)* Pormenor da zona da amostra para o corte; *c)* Amostras prontas nas lamelas de vidro; *d)* Microscópio de Transmissão Olympus.

3.9. Simulação MoldFlow

A partir do software de simulação Autodesk MoldFlow Adviser 2014 foi possível fazer uma previsão do comportamento do fluido no enchimento da impressão no interior do bloco moldante. Assim, variando as condições de processamento, com os respectivos dados do material a injetar, obtiveram-se resultados com valores próximos da realidade. Por exemplo, podemos verificar o tempo de enchimento na condição A (figura 67).

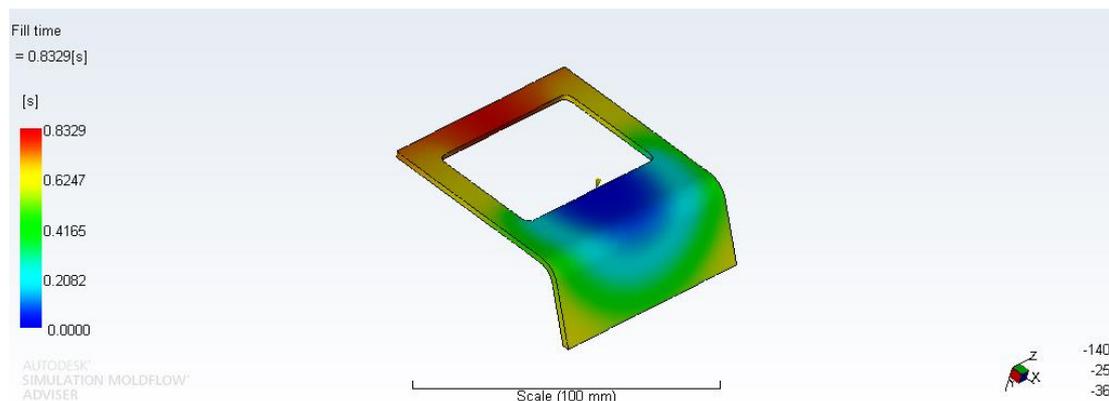


Figura 67 Exemplo da simulação do tempo de enchimento na condição A ($T_{\text{injeção}} = 200$ °C; $T_{\text{molde}} = 20$ °C)

A figura 68 mostra a distribuição da pressão de injeção na condição E e a figura 71 na condição I.

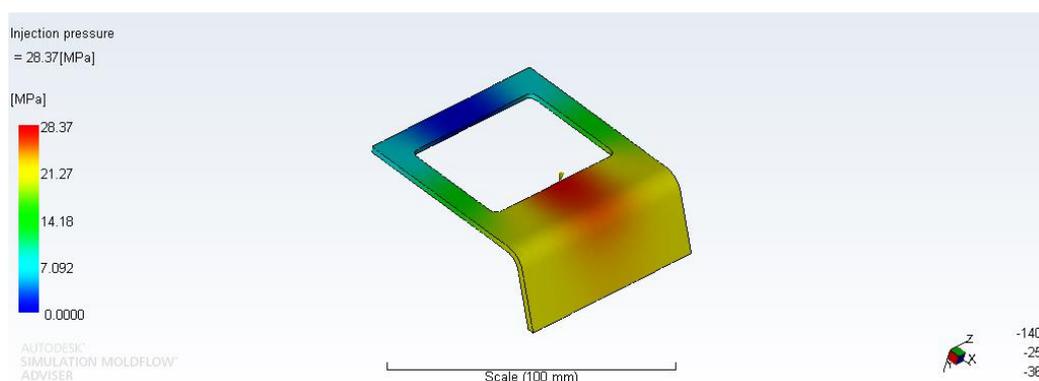


Figura 68 Exemplo da simulação da pressão de injeção na condição E ($T_{\text{injeção}} = 225$ °C; $T_{\text{molde}} = 40$ °C)

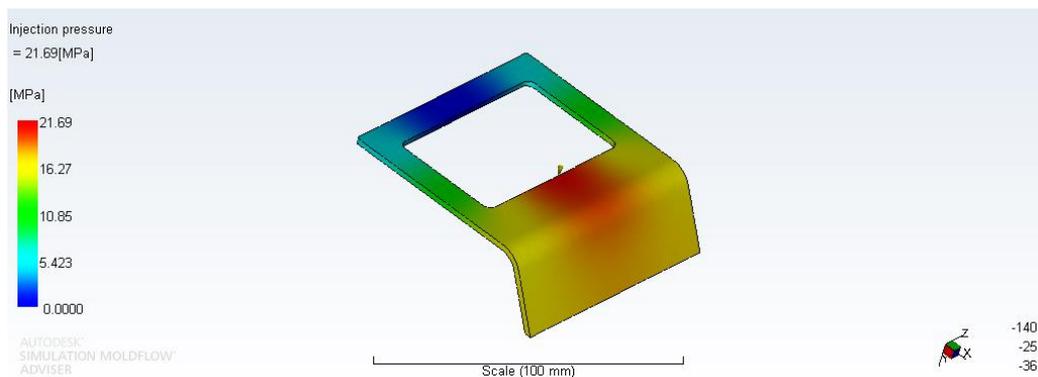


Figura 69 Exemplo da simulação da pressão de injeção na condição I (T_{injeção} = 250 °C; T_{molde} = 60 °C)

A figura 70 exemplifica a simulação da temperatura da frente do fundido na condição G.

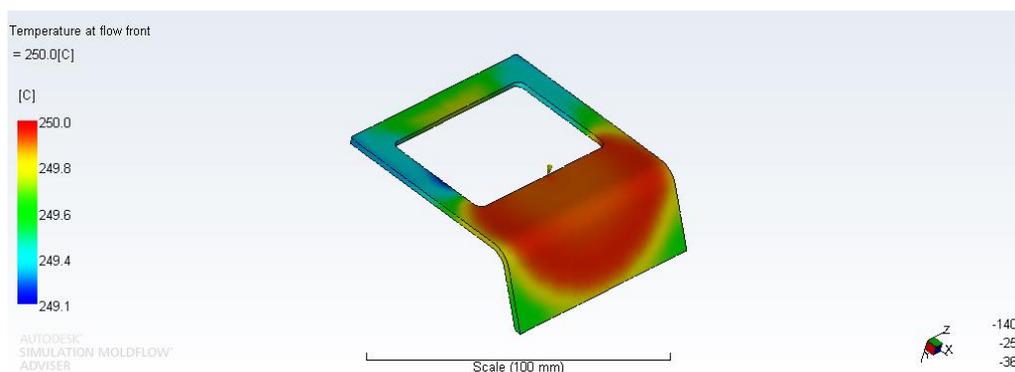


Figura 70 Exemplo de um resultado da simulação da temperatura da frente do fundido na condição G (T_{injeção} = 250 °C; T_{molde} = 20 °C)

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização Mecânica

Tendo em conta as propriedades mecânicas dos materiais, quando estão sujeitos a muitos ciclos de injeção e a elevadas pressões e temperaturas durante o processo de injeção, torna-se importante fazer uma caracterização mecânica do material nas diversas condições de processamento.

4.2. Ensaios de Tração

4.2.1. Bloco Moldante em Aço

Nos ensaios de tração do bloco moldante em aço, foram realizados ensaios em 7 provetes de cada condição de processamento. Calculou-se o valor do módulo de elasticidade (E) e após o cálculo do desvio-padrão retiraram-se os 2 provetes com resultados fora do intervalo (média + desvio-padrão, média - desvio-padrão). Obteve-se também para cada condição de processamento o valor da tensão máxima.

Os gráficos seguintes mostram os resultados das curvas Tensão-Deformação das peças produzidas no bloco moldante em Aço.

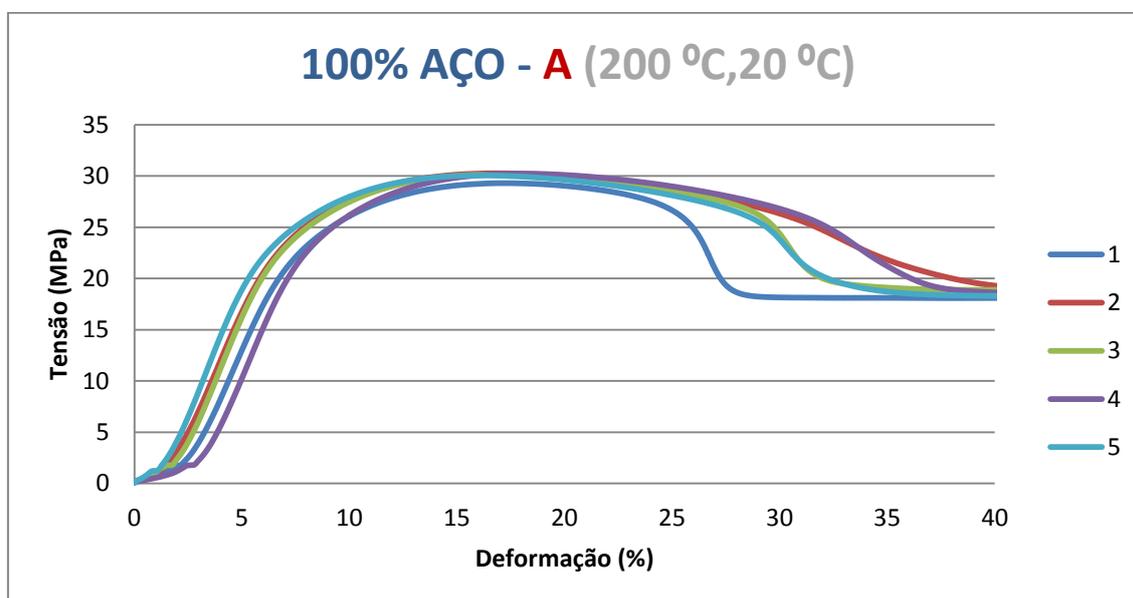


Figura 71 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento A.

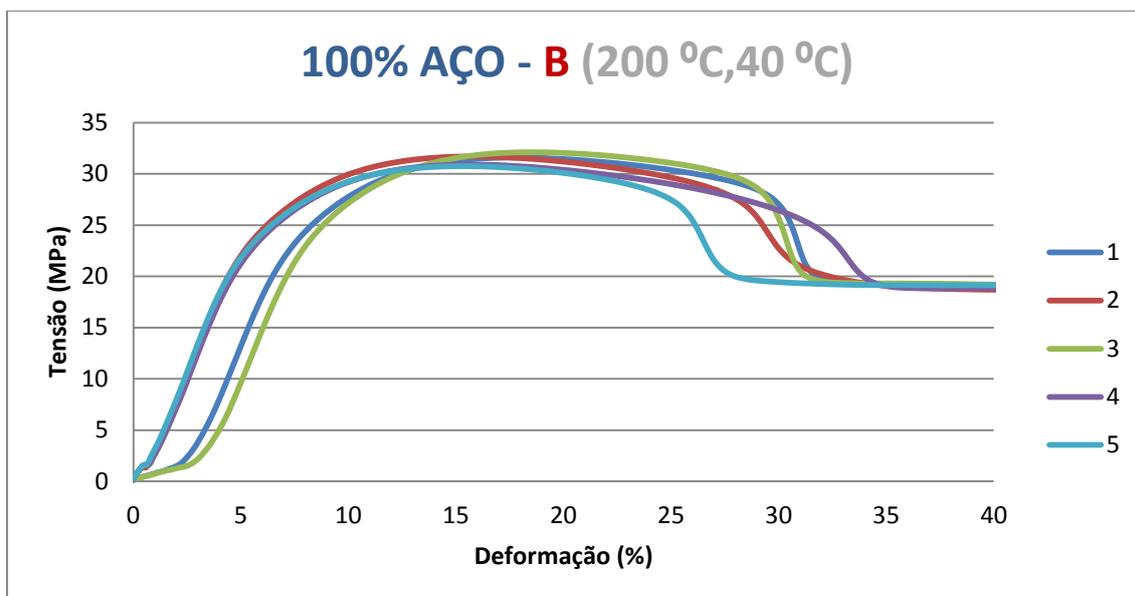


Figura 72 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço –
Condição de Processamento B.

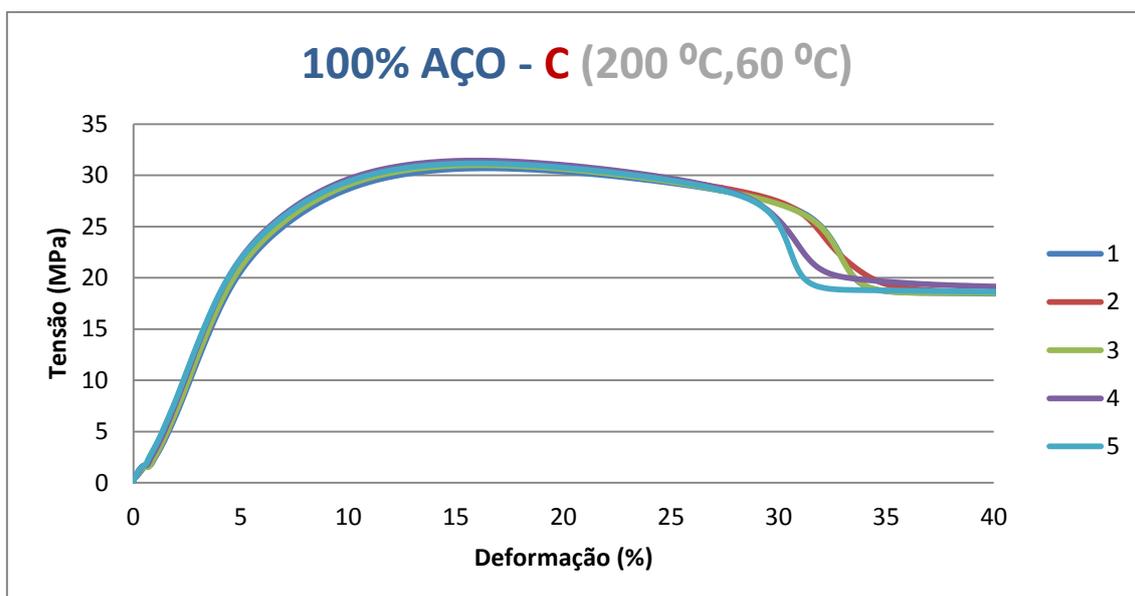


Figura 73 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço –
Condição de Processamento C.

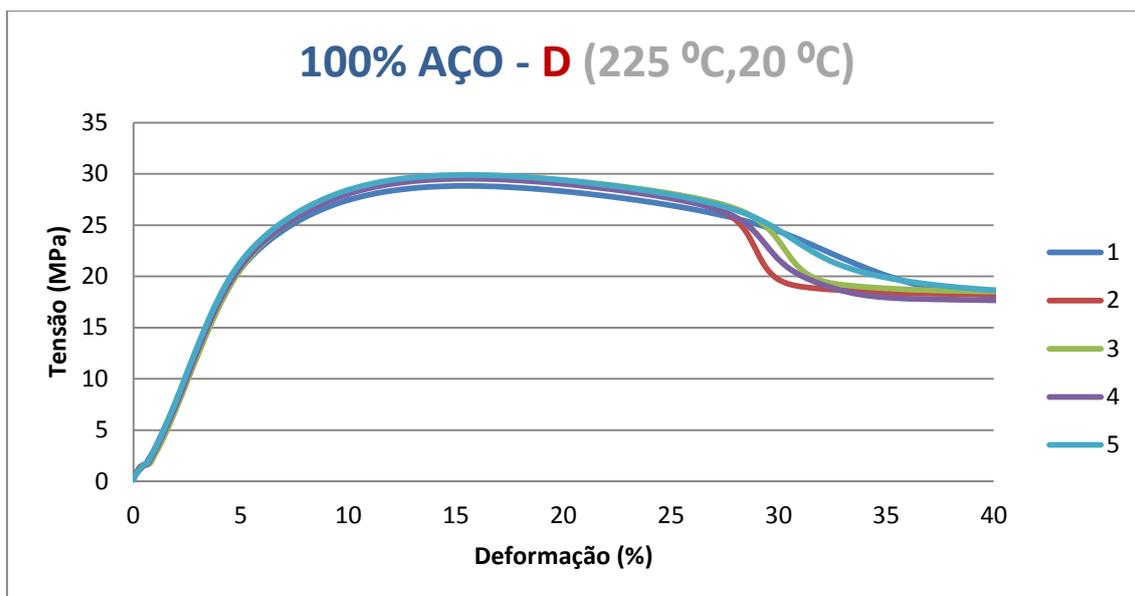


Figura 74 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento D.

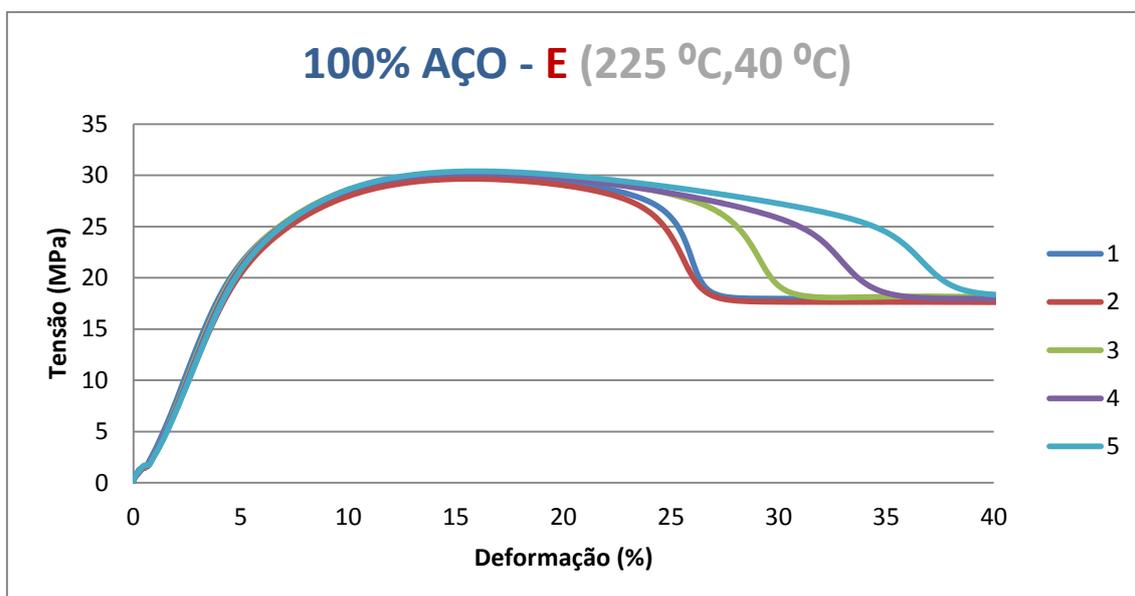


Figura 75 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento E.

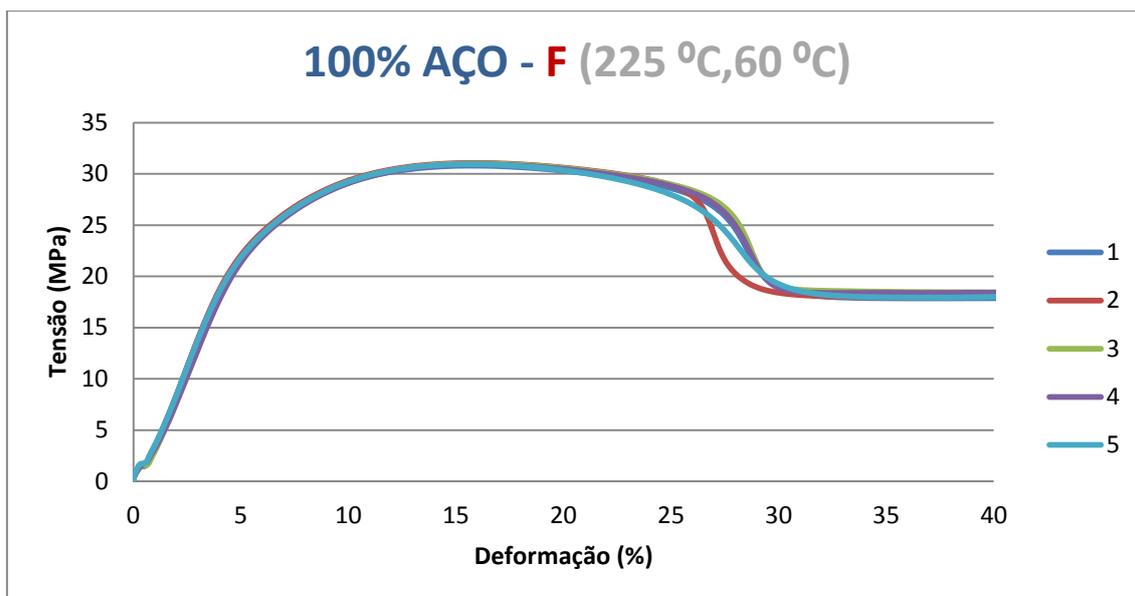


Figura 76 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço –
Condição de Processamento F.

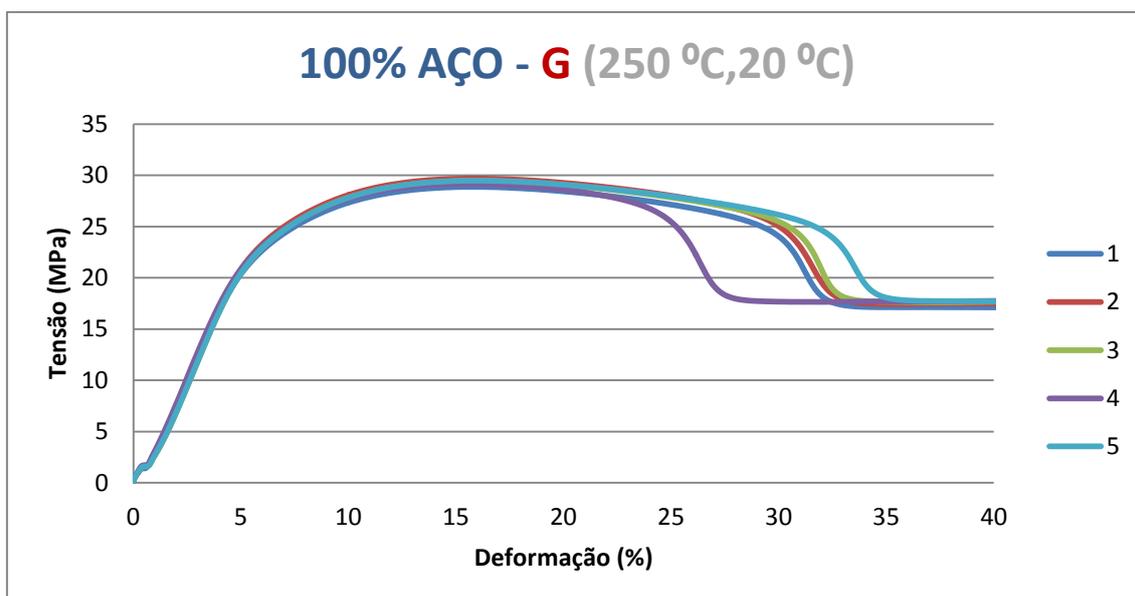


Figura 77 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço –
Condição de Processamento G.

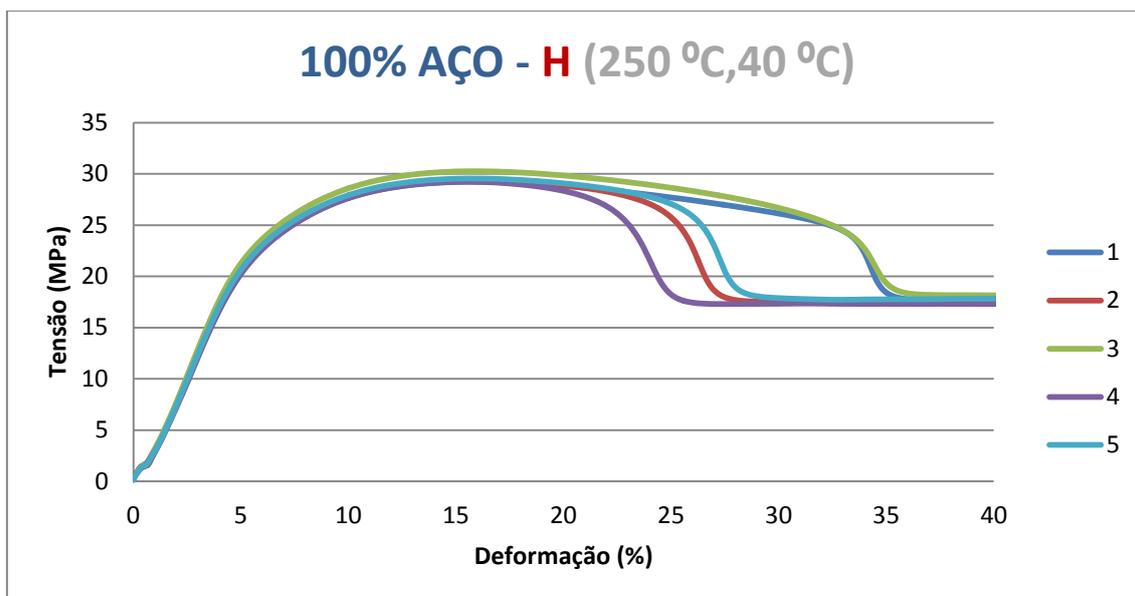


Figura 78 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento H.

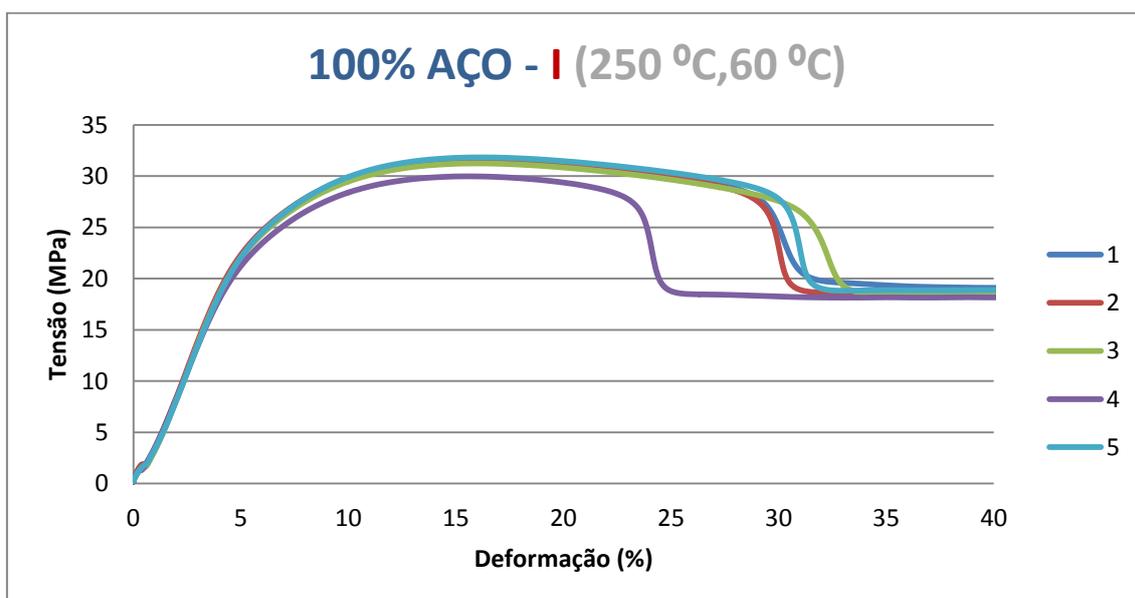


Figura 79 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em Aço – Condição de Processamento I.

Através dos resultados das curvas tensão-deformação, podemos verificar que os valores obtidos são muito idênticos em todas as condições de A até I. A tensão máxima ronda, em todas as condições de processamento os 30 MPa e a deformação está situada entre os 25% e os 35%.

4.2.2. Bloco Moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida

No caso do bloco moldante com 15% de fibra curta de aço e 85% de resina epóxida, foram realizados 7 provetes de cada condição de processamento, e após o cálculo do desvio-padrão do valor do módulo de elasticidade (E), retiraram-se os 2 provetes com resultados fora do intervalo (média + desvio-padrão, média - desvio-padrão).

Nas condições de processamento de A até E, a maioria dos ensaios de tração tiveram um estiramento mais alongado, enquanto nas condições finais, de F até I, os provetes partiram de imediato na zona mais crítica, a zona de soldadura. Para cada condição de processamento foi retirado o valor da tensão máxima.

Os gráficos seguintes mostram os resultados das curvas Tensão-Deformação do bloco moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida.

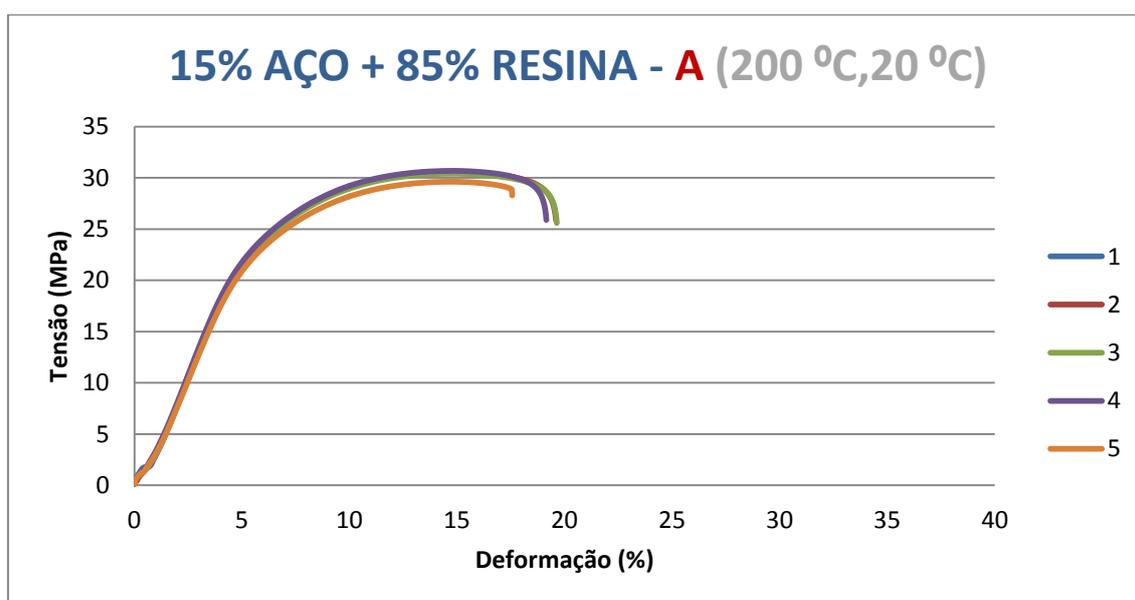


Figura 80 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento A.

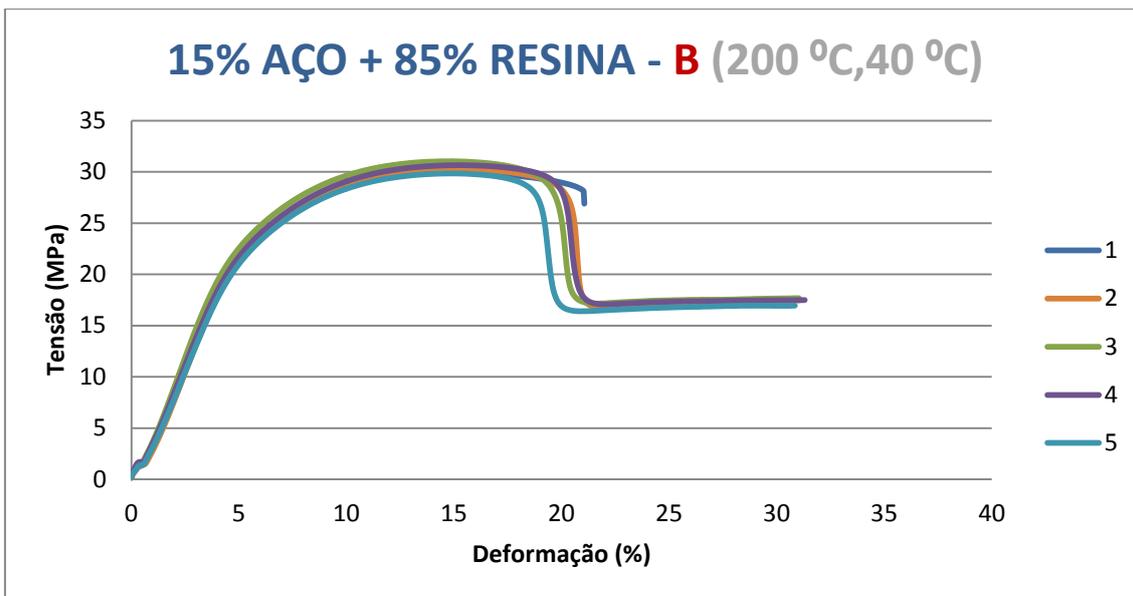


Figura 81 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento B.

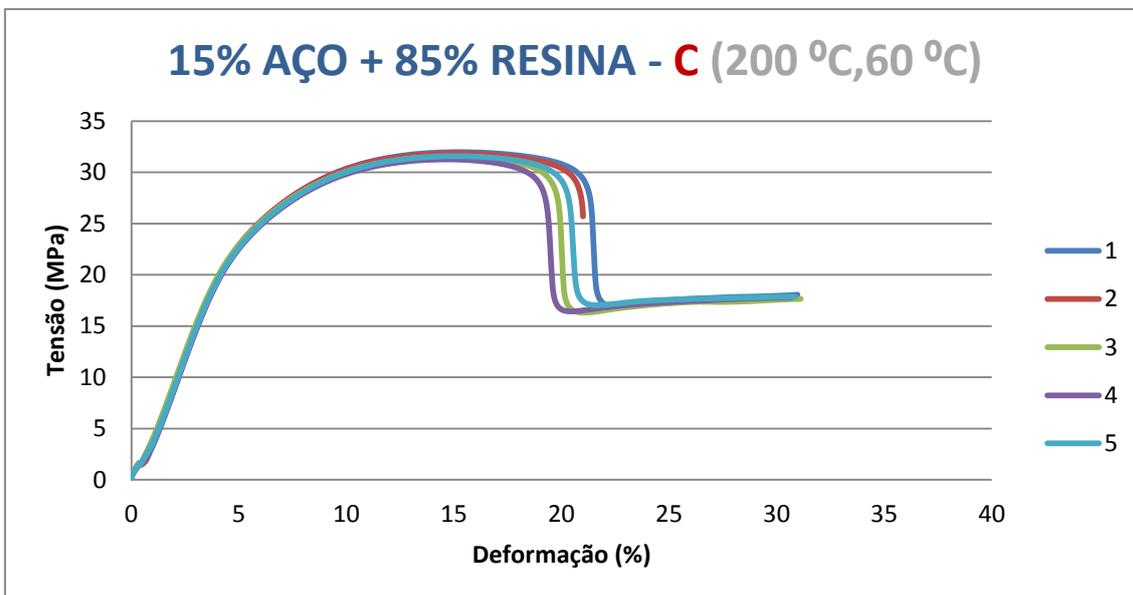


Figura 82 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento C.

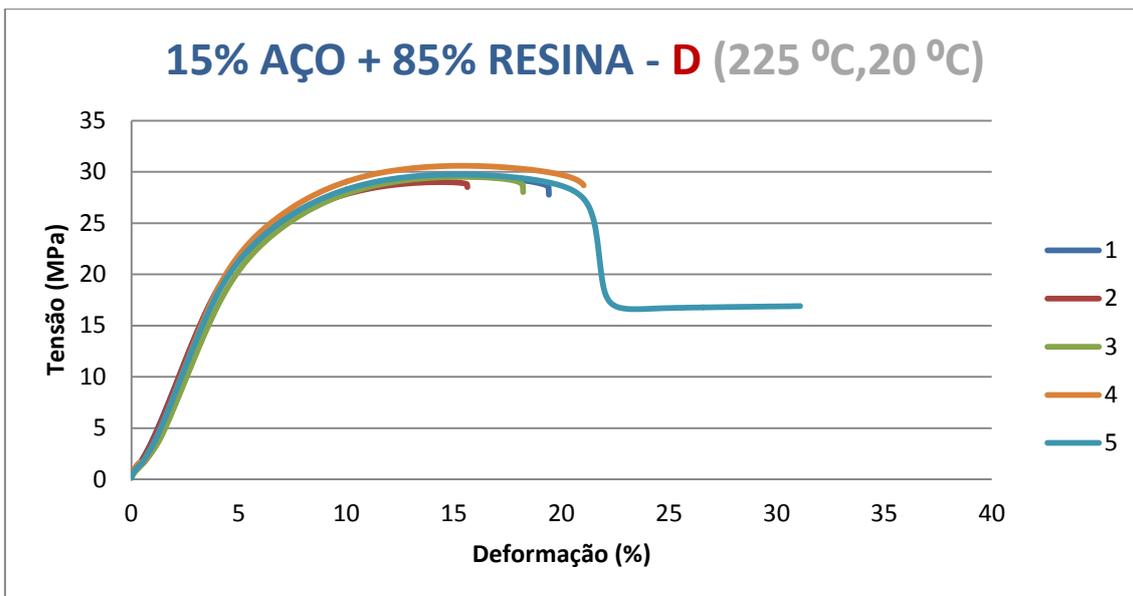


Figura 83 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento D.

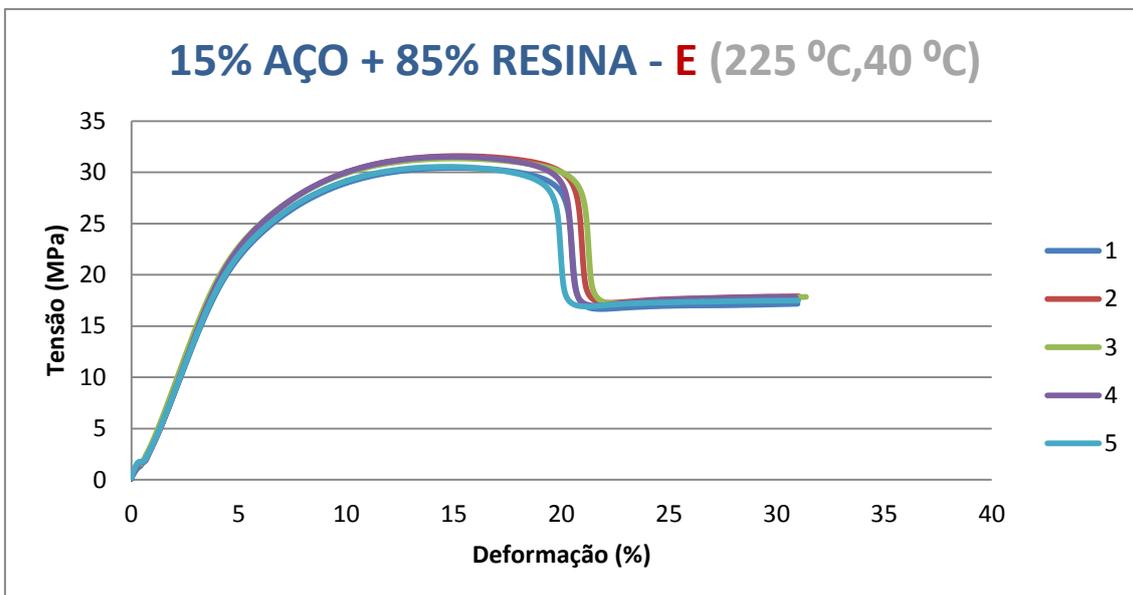


Figura 84 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento E.

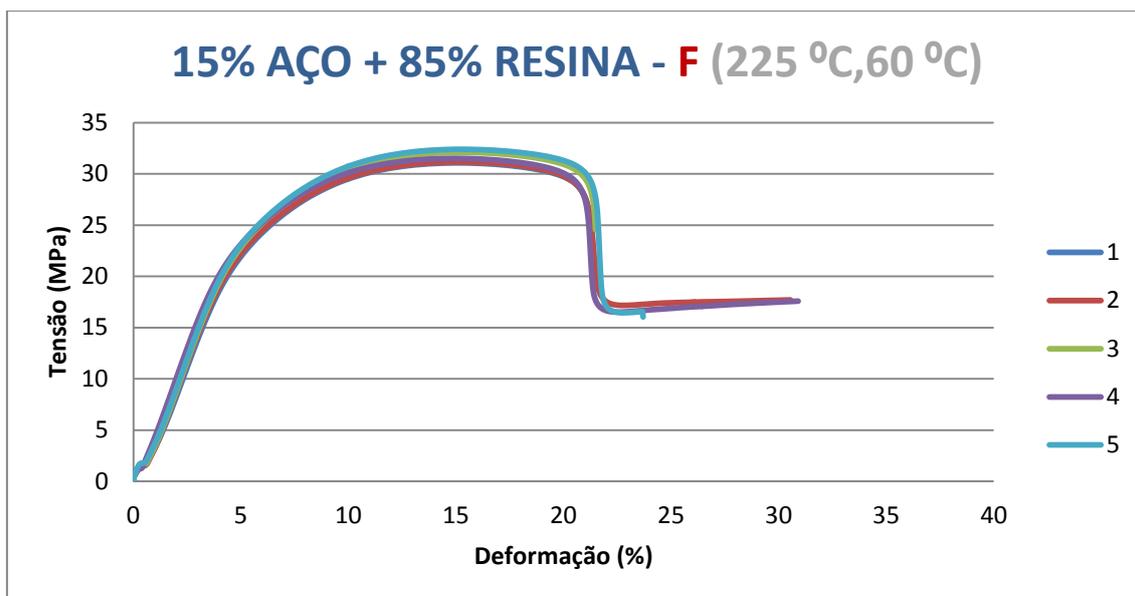


Figura 85 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento F.

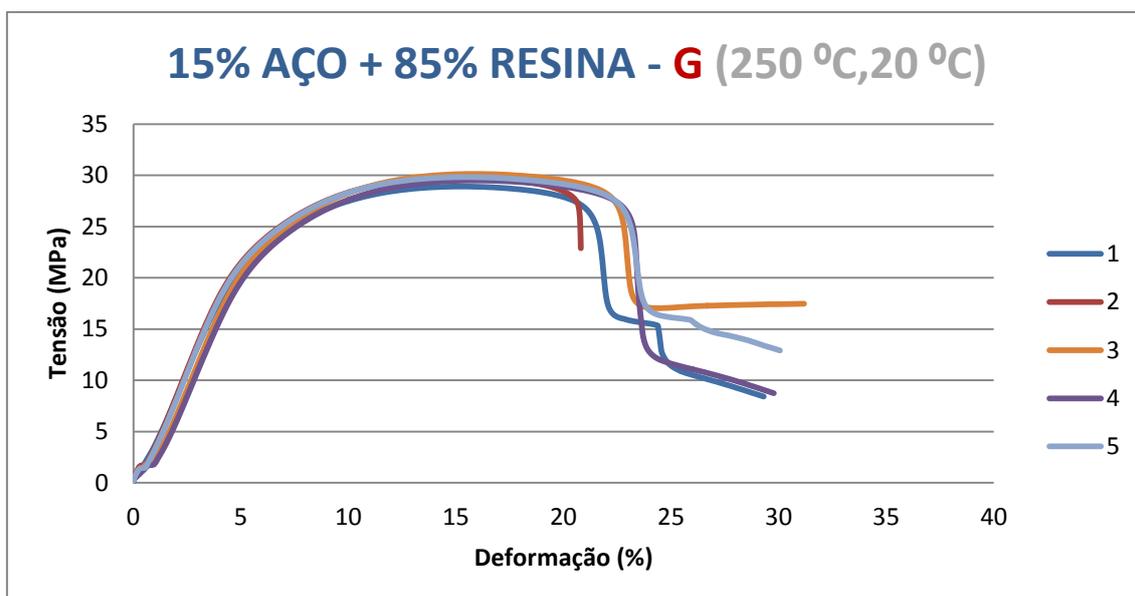


Figura 86 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento G.

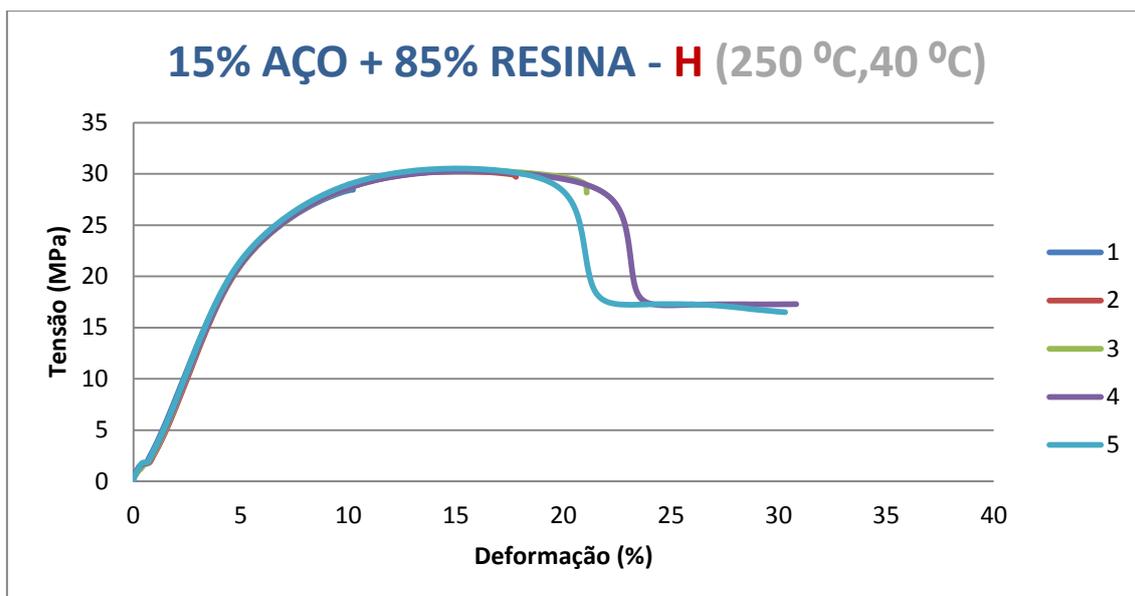


Figura 87 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento H.

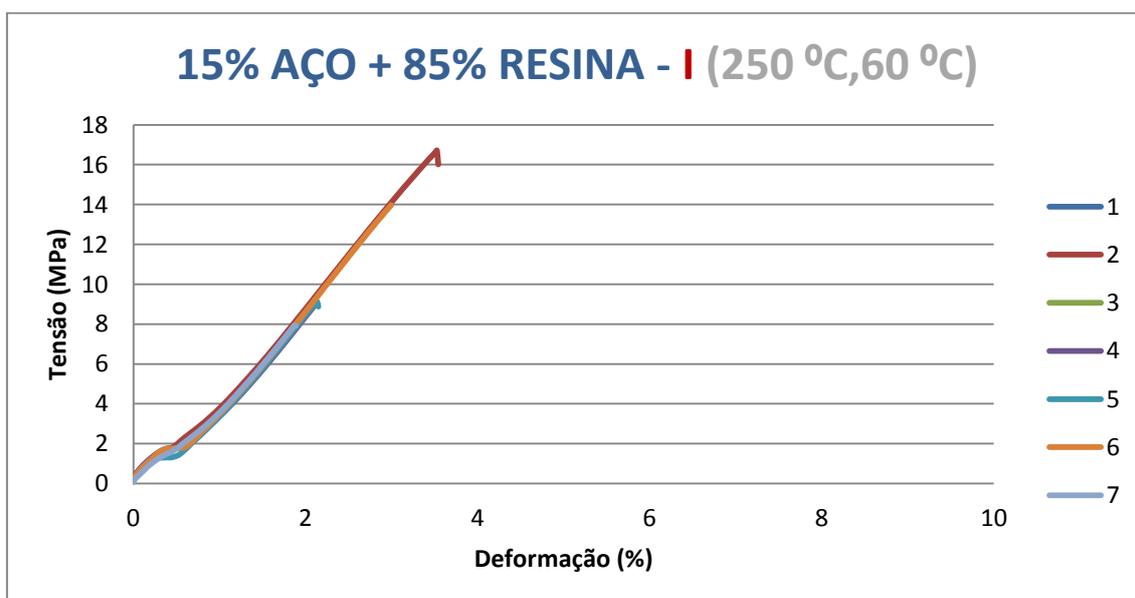


Figura 88 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida – Condição de Processamento I.

Através dos resultados das curvas Tensão-Deformação do bloco moldante 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida, podemos verificar que os valores obtidos para a curva tensão-deformação são muito idênticos em todas as condições de A até H. A tensão máxima ronda em todas as condições de processamento os 30 MPa,

excetuando a condição I, que apresenta um valor mais pequeno, cerca de 17 MPa. A deformação em quase todas as condições está situada nos 20%, com a exceção da condição de processamento I, onde o provete partiu de imediato na zona de soldadura, apresentando uma deformação entre os 2% e 4%.

4.2.3. Bloco Moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida

No caso do bloco moldante com 60% de pó de alumínio e 40% de resina epóxida, foram realizados ensaios em 7 provetes de cada condição de processamento, e após o cálculo do desvio-padrão do valor do módulo de elasticidade (E), retiraram-se os 2 provetes com resultados fora do intervalo (média + desvio-padrão, média - desvio-padrão). Nas condições de processamento A, B e C, os provetes apresentaram um estiramento mais alongado. Em D, E e F, alguns apresentaram um estiramento médio e outros partiram na zona da linha de soldadura. Enquanto as condições G, H e I, partiram todas na zona da linha de soldadura. Para cada condição de processamento foi retirado o valor da tensão máxima.

Os gráficos seguintes mostram os resultados das curvas Tensão-Deformação do bloco moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida.

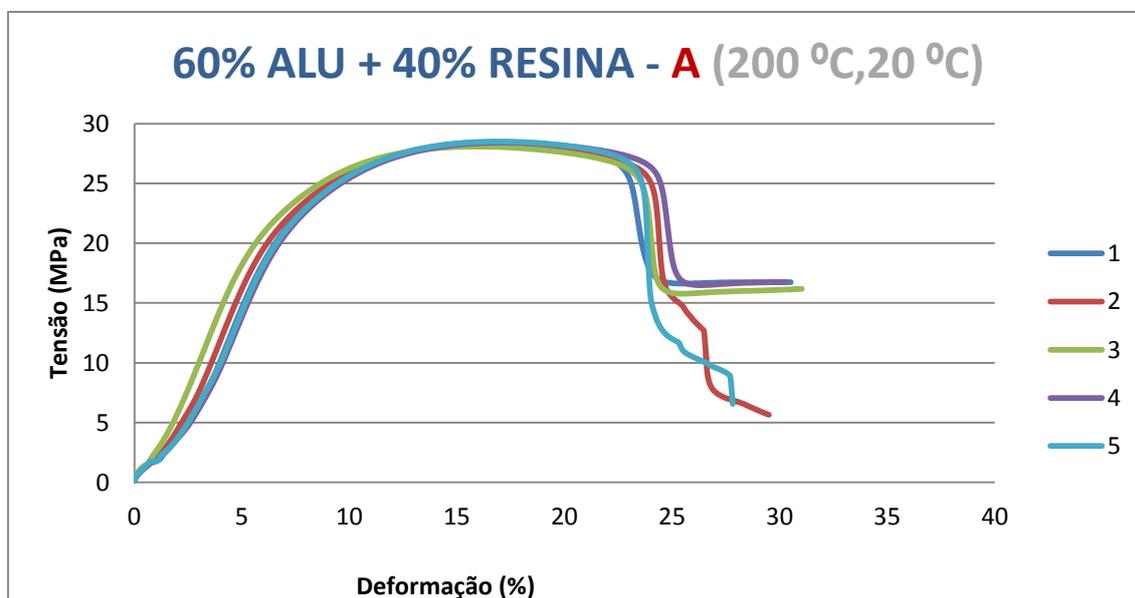


Figura 89 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento A.

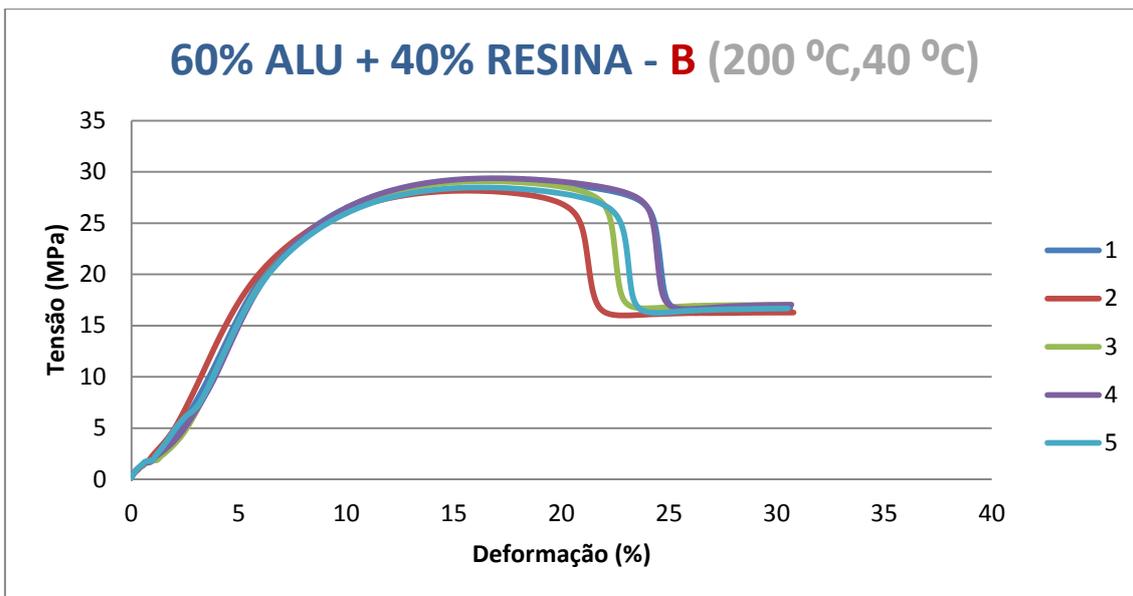


Figura 90 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento B.

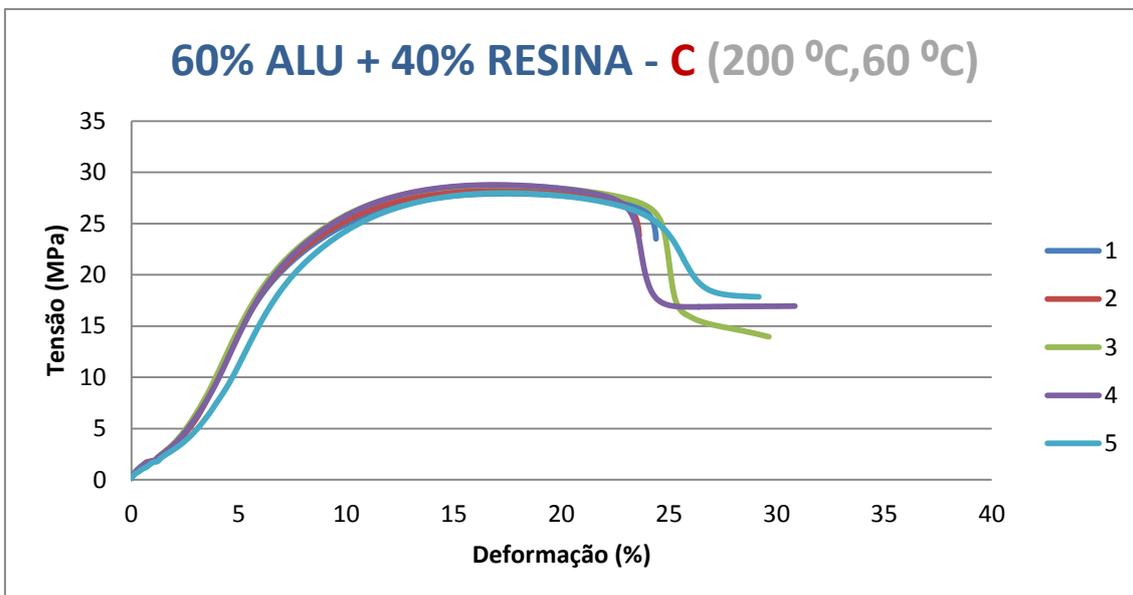


Figura 91 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento C.

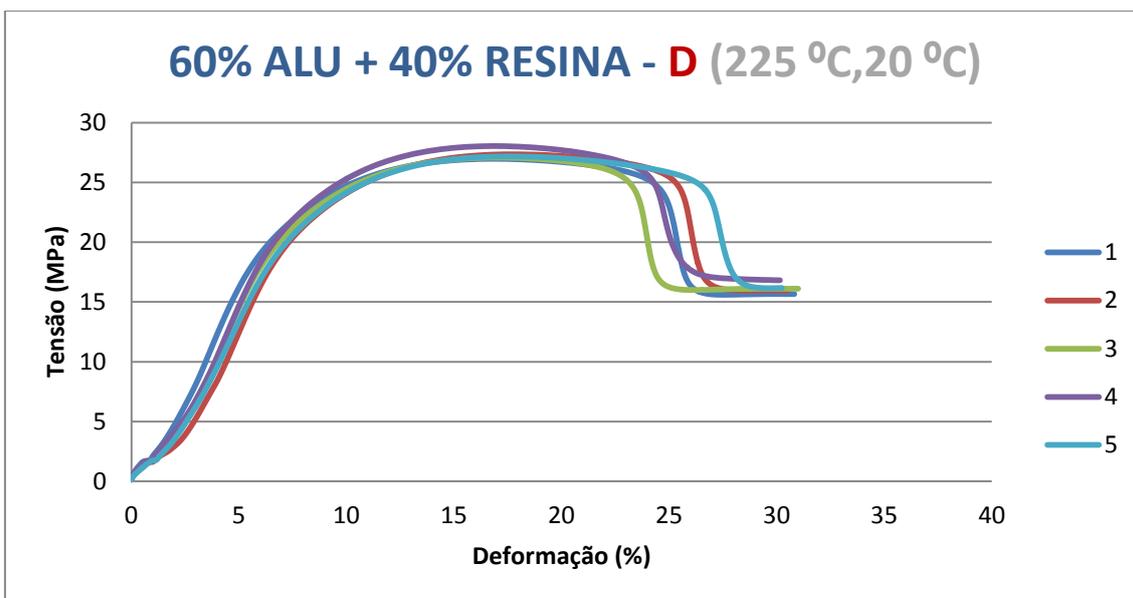


Figura 92 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento D.

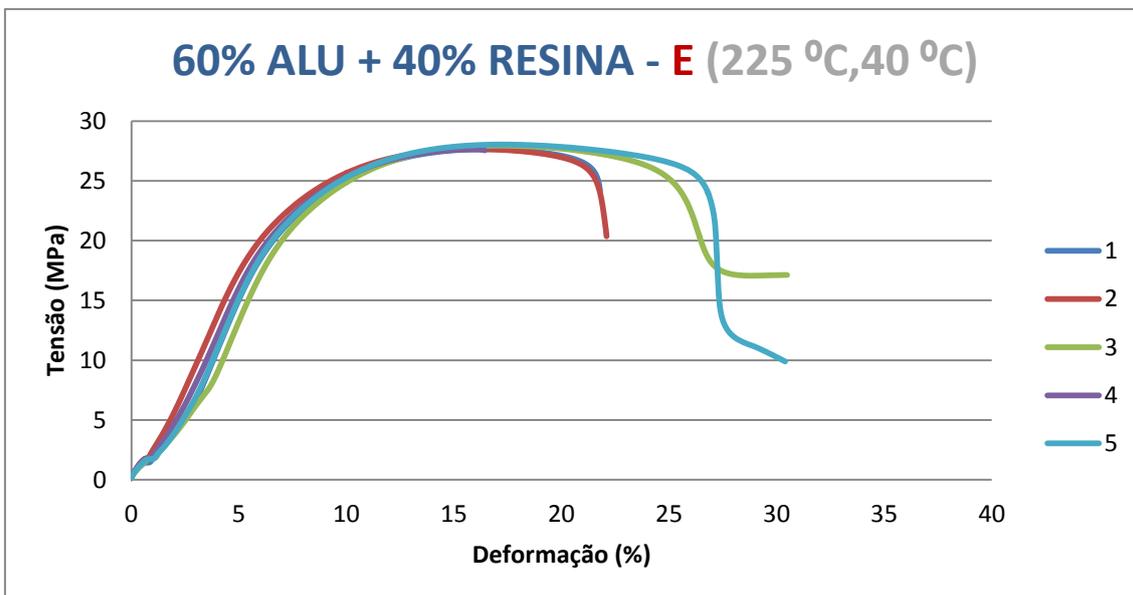


Figura 93 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento E.

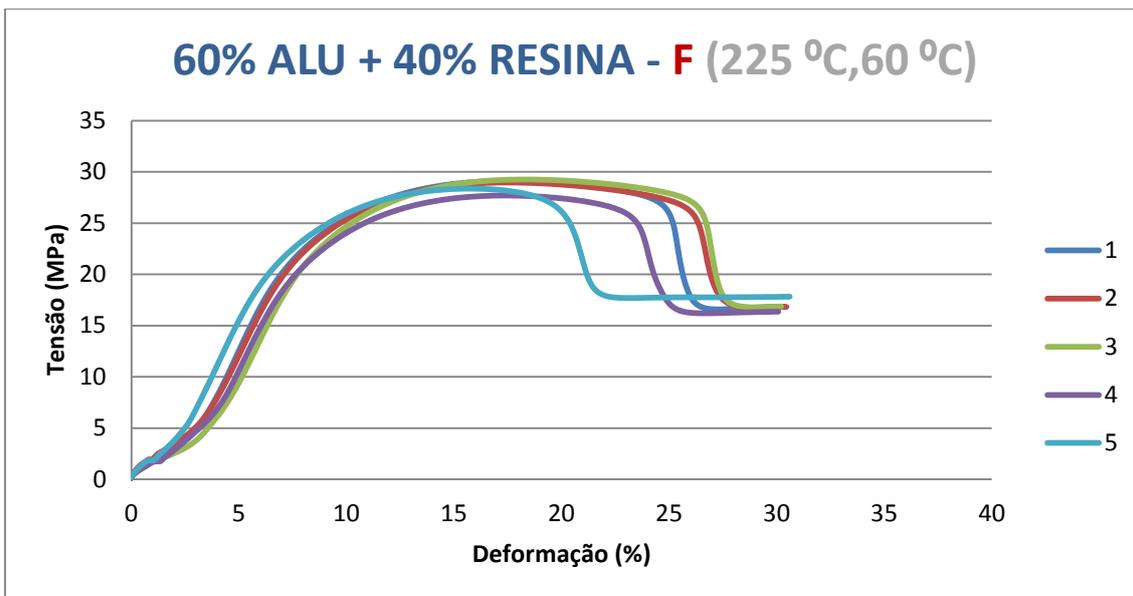


Figura 94 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento F.

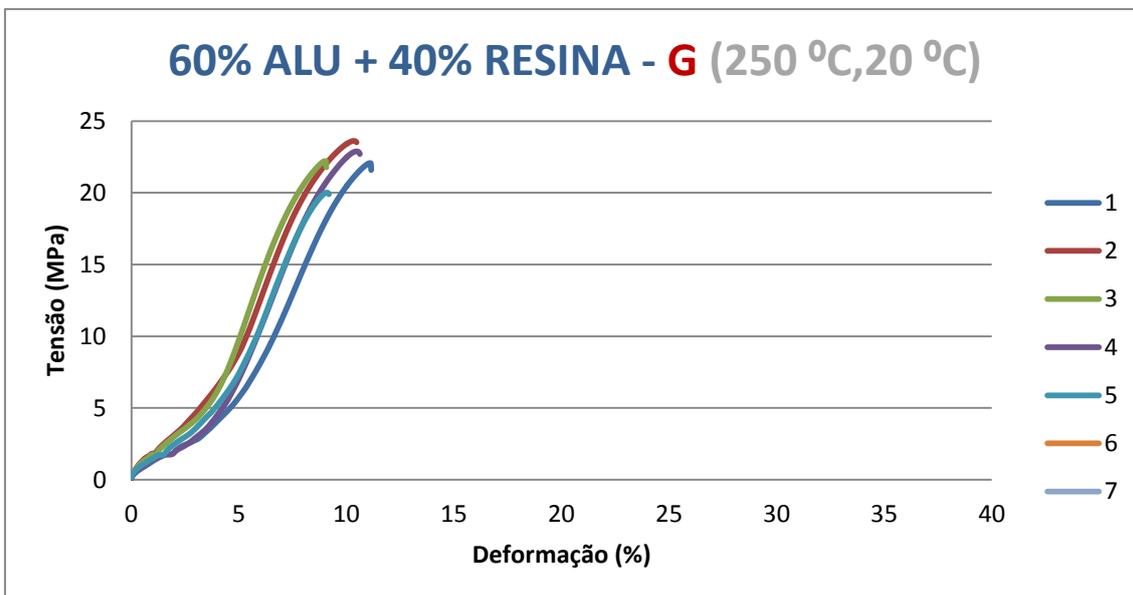


Figura 95 Ensaio de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento G.

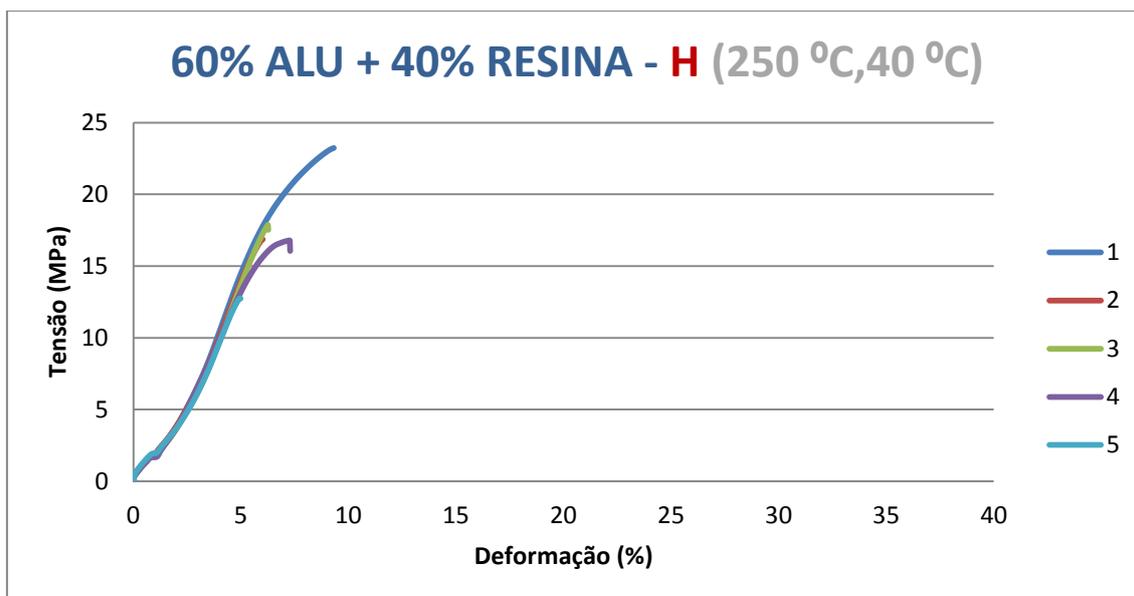


Figura 96 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento H.

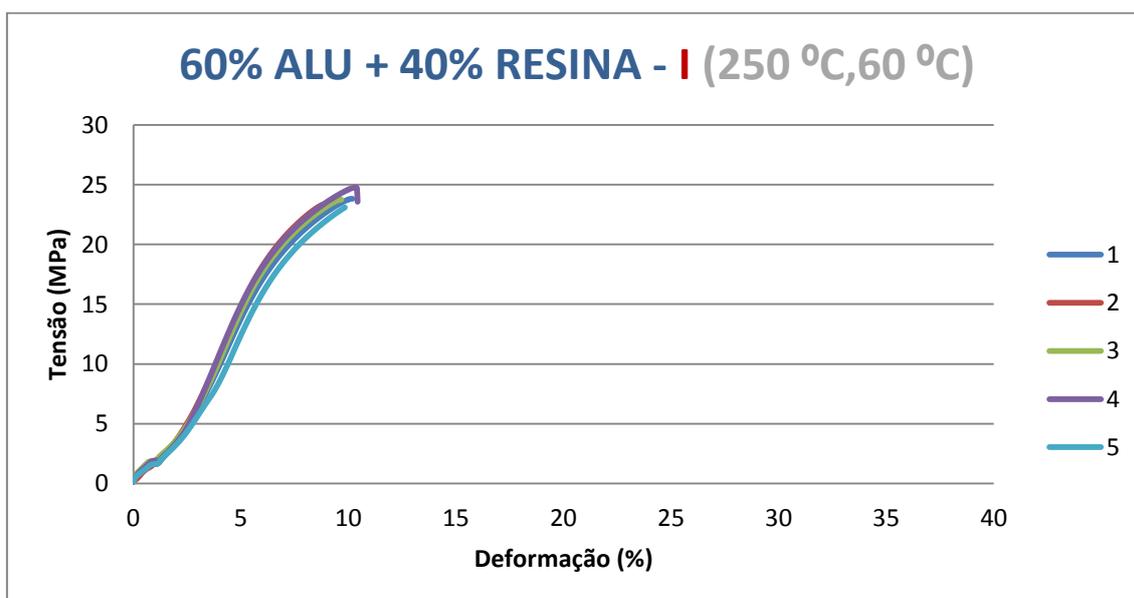


Figura 97 Ensaios de tração dos provetes injetados no bloco moldante em 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida – Condição de Processamento I.

Através dos resultados das curvas Tensão-Deformação do bloco moldante 60% pó de alumínio + 40% de resina epóxida, podemos verificar que os valores obtidos para a curva tensão-deformação são muito idênticos em todas as condições de A até F, excetuando as condições G, H e I, que apresentam valores mais pequenos. A tensão

máxima ronda em todas as condições de processamento os 25 MPa e os 27 MPa. A deformação nas condições de processamento de A até F está situada nos 25%, com a exceção da condição de processamento G, H e I, onde o provete partiu de imediato na zona de soldadura, apresentando uma deformação entre os 6% e 10%.

Através dos resultados obtidos nos gráficos dos três blocos moldantes (figura 98), podemos concluir que os valores do módulo de elasticidade (E) apresentados, são mais elevados no caso do bloco moldante com 15% de fibra curta de aço com 85% resina epóxida e no bloco moldante de aço, com valores a rondar entre os 290 MPa e os 350 MPa.. No caso da condição A, o bloco moldante em 100% de aço apresenta valores de módulo de elasticidade muito baixo, isto deve-se ao fato da temperatura de injeção e do molde serem demasiado baixas, podendo influenciar as características da linha de soldadura. Relaciona-se também com o fato da condutividade térmica do bloco em aço ser maior que a do bloco moldante com 15% de fibra curta de aço e 85% resina epóxida e no bloco moldante 60% pó de alumínio com 40% de resina epóxida. O tempo de arrefecimento é superior nos blocos moldantes compósitos, tendo nestes casos o polímero fundido mais tempo para criar zonas cristalinas e conseqüentemente aumentar a zona da casca, alterando assim a sua morfologia e também as suas propriedades mecânicas.

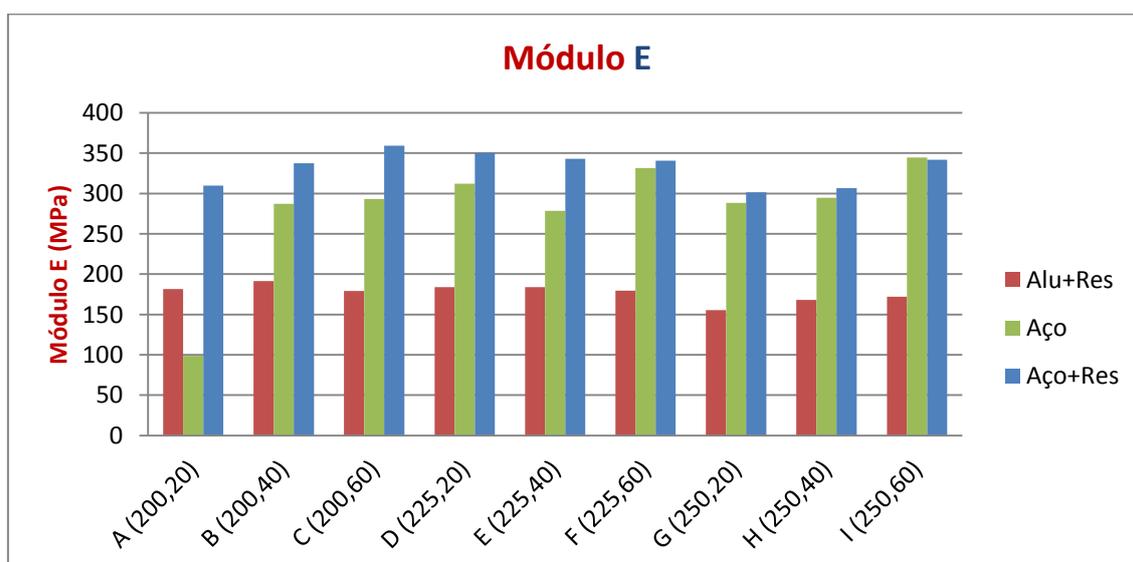


Figura 98 Módulo de Elasticidade (E).

Os valores do módulo de elasticidade para o bloco moldante com 60% pó de alumínio com 40% de resina epóxidada são muito idênticos ao longo de todas as condições de processamento (170 MPa e 180 MPa), não se verificando grande influência nas características do módulo de elasticidade com a variação das condições de processamento.

Nos blocos moldantes em aço e no compósito com 85% de fibras de aço com resina epóxidada as propriedades da soldadura são melhores que no compósito com 60% de pó de alumínio com resina epóxidada, pois os blocos moldantes não dissipam tanta energia como este último, logo, o polímero fundido atinge a zona de soldadura com temperaturas superiores ao bloco moldante composto por 60% pó de alumínio e 40% resina epóxidada.

Note-se que, de um modo em geral, à medida que se aumenta a temperatura do molde, mantendo a mesma temperatura de injeção, os valores do módulo de elasticidade também aumentam, salvo nalguns casos dos compósitos com resina nos valores intermédios da temperatura de injeção a 225 °C, isto poderá dever-se ao fato de nas temperaturas de injeção mais elevadas o tempo de arrefecimento ser superior nos blocos moldantes com resina epóxidada, podendo-se registar alteração das características morfológicas do polímero aquando do seu arrefecimento.

Em relação aos resultados apresentados da tensão máxima (σ_{max}), são muito idênticos em quase todas as condições de processamento de A a F, como podemos verificar no gráfico em baixo (figura 99), em todos os três tipos de blocos moldantes, sendo que no compósito de alumínio com resina, os valores são ligeiramente mais pequenos, mas muito próximos, todos eles a rondar os 28 MPa e 31 MPa.

Nas condições de processamento G e H, os resultados já apresentam uma ligeira diferença entre os três tipos de blocos moldantes, embora nos blocos de aço e no bloco moldante com 15% de fibra curta de aço e 85% resina epóxidada os valores da tensão máxima ainda sejam idênticos às condições de processamento anteriores. O mesmo já não acontece com o bloco moldante de alumínio com resina epóxidada, onde a tensão máxima diminui significativamente.

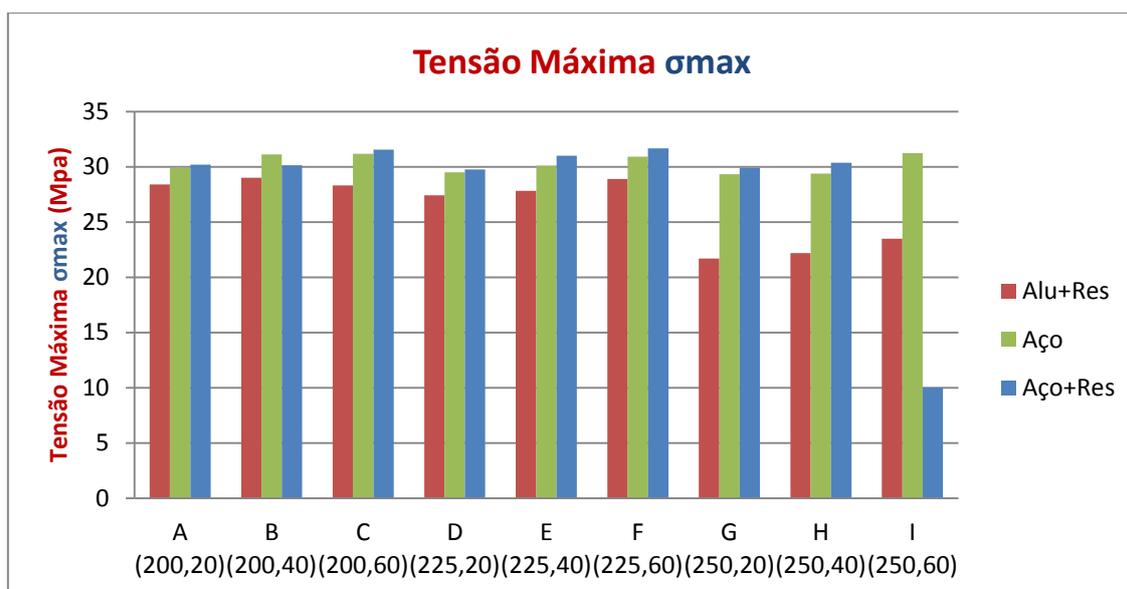


Figura 99 Tensão Máxima obtida para os três blocos moldantes em estudo.

Por fim, na condição de processamento I, enquanto o bloco em aço mantém as características anteriores do valor da tensão máxima, o mesmo não acontece no bloco moldante com 15% de fibra curta de aço e 85% resina epóxida. Isto deve-se ao fato das temperaturas de injeção e do molde serem elevadas nos compósitos com resina epóxida levando a alterações na sua morfologia das peças injetadas aquando do arrefecimento, e consequentemente as características propriedades mecânicas finais do polímero.

Em geral, mantendo a temperatura de injeção, verifica-se um aumento da tensão máxima à medida que se aumenta a temperatura do molde. Isso deve-se também ao fato da temperatura do molde influenciar a camada exterior da peça injetada criando zonas com maior orientação molecular.

4.3. Caracterização Morfológica – Análise Microscópica

Para este estudo, recorreu-se à técnica de microscopia por transmissão. A área estudada foi a zona da linha de soldadura, pretendendo-se verificar a influência que as temperaturas do molde e de injeção tinham nesta em cada tipo de bloco moldante.

4.3.1. Bloco Moldante 100% em Aço

No bloco moldante em aço, tal como podemos verificar na figura 100, à medida que se aumenta a temperatura de injeção diminui a percentagem da casca na zona da linha de soldadura.

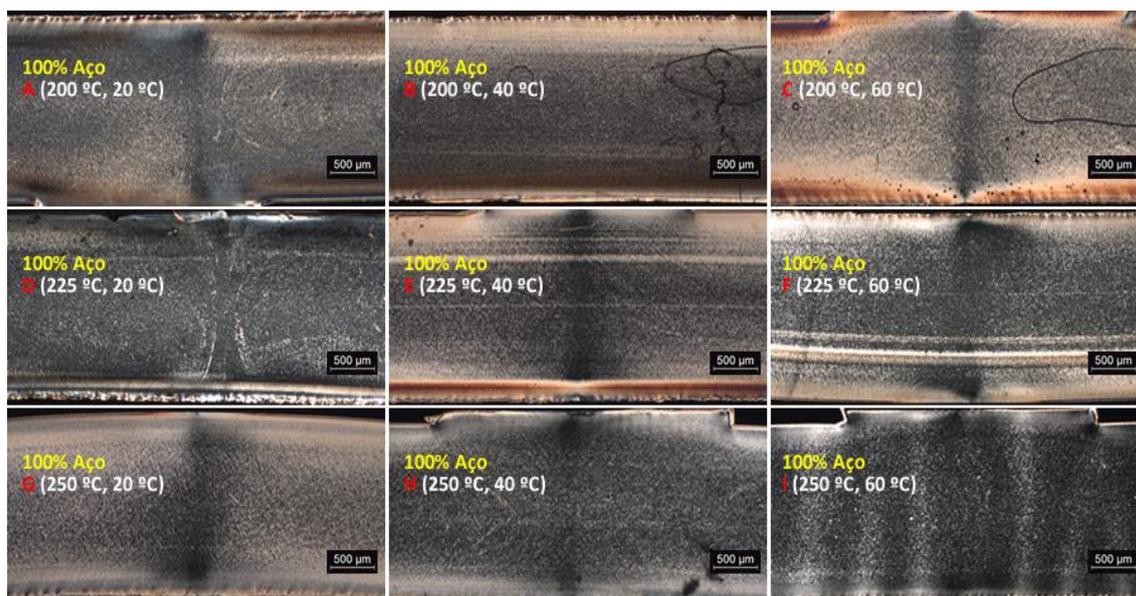


Figura 10 Imagem das cascas dos provetes injetados no bloco moldante convencional

Tendo por base, as imagens obtidas na figura 10, e recorrendo à medida padrão inserida na imagem microscópica, efetuou-se o cálculo em percentagem da casca total na amostra, tal como podemos verificar na tabela 9.

Tabela 9 Resultado das percentagens de casca dos provetes injetados no bloco moldante em Aço.

Condição	AÇO			Casca (%)
	Baixo (µm)	Cima (µm)	Total (µm)	
A (200 °C, 20 s)	164,18	104,48	268,66	13,43
B (200 °C, 40 s)	179,10	104,48	283,58	14,18
C (200 °C, 60 s)	164,18	134,33	298,51	14,93
D (225 °C, 20 s)	119,40	89,55	208,95	10,45
E (225 °C, 40 s)	119,40	119,40	238,80	11,94
F (225 °C, 60 s)	119,40	74,63	194,03	9,70
G (250 °C, 20 s)	74,63	59,70	134,33	6,72
H (250 °C, 40 s)	59,70	44,77	104,47	5,22
I (250 °C, 60 s)	59,70	29,85	89,55	4,48
Média	117,74	84,58	202,32	10,12

O fato de se aumentar a temperatura do molde, mantendo o tempo de arrefecimento, e como a velocidade de injeção é mais elevada do que nos blocos

moldantes com compósitos de fibra curta de aço e pó de alumínio, o material tem menos tempo para solidificar, logo tem cascas com menores espessuras à medida que se aumenta a temperatura do molde e de injeção, e cascas mas orientadas, devido ao arrefecimento mais brusco no interior da moldação produzida no bloco moldante em aço.

4.3.2. Bloco Moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida

No bloco moldante com 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida, à medida que se aumenta a temperatura de injeção, a percentagem da casca na zona da linha de soldadura é muito idêntica nas condições de processamento de A até G, enquanto nos casos de H e I os valores da percentagem de casca diminuem.

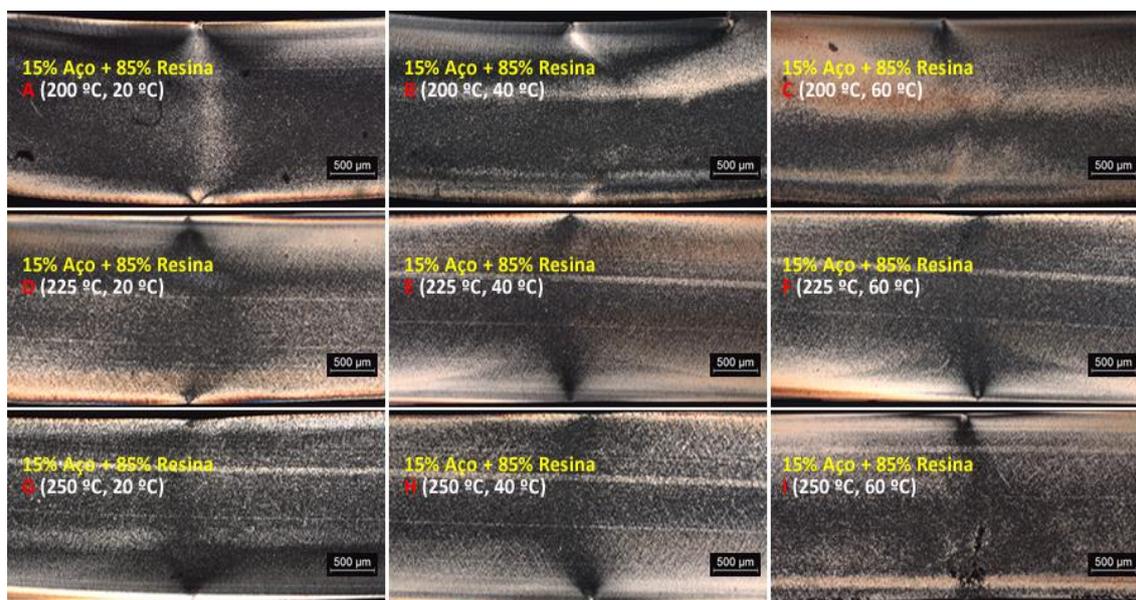


Figura 101 Imagem das cascas dos provetes injetados no bloco moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida

Tendo por base, as imagens obtidas na figura 101, e recorrendo à medida padrão inserida na imagem microscópica, efetuou-se o cálculo, em percentagem, da casca total na amostra, tal como podemos verificar na tabela 10.

Tabela 10 Resultado das percentagens de casca dos provetes injetados no bloco moldante 15% Fibra Curta de Aço + 85% Resina Epóxida.

15% Aço + 85% Resina				
Condição	Baixo (µm)	Cima (µm)	Total (µm)	Casca (%)
A (200 °C, 20 °C)	104,48	59,70	164,18	8,21
B (200 °C, 40 °C)	119,40	74,73	194,13	9,71
C (200 °C, 60 °C)	104,48	89,55	194,03	9,70
D (225 °C, 20 °C)	134,33	59,70	194,03	9,70
E (225 °C, 40 °C)	104,48	89,55	194,03	9,70
F (225 °C, 60 °C)	134,33	74,63	208,96	10,45
G (250 °C, 20 °C)	119,40	74,63	194,03	9,70
H (250 °C, 40 °C)	74,63	59,70	134,33	6,72
I (250 °C, 60 °C)	89,55	74,63	164,18	8,21
Média	109,45	72,98	182,43	9,12

O fato de se aumentar a temperatura do molde e o tempo de arrefecimento nos blocos moldantes compósitos, e como a velocidade de injeção é mais pequena que no bloco moldante em aço, o material tem mais tempo para solidificar, a casca apresenta menor orientação a temperaturas mais elevadas, e o módulo de elasticidade é menor, logo tem cascas com maiores percentagens à medida que se aumenta a temperatura do molde e de injeção, isto em comparação com o bloco moldante em aço.

4.3.3. Bloco Moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida

No bloco moldante com 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida, à medida que se aumenta a temperatura de injeção, a percentagem da casca na zona da linha de soldadura também aumenta para valores idênticos nas condições de A até F, como se pode verificar na figura 102.

No caso das condições de processamento G, H e I, esse valor da percentagem de casca aumenta. Pode associar-se este resultado ao fato de se baixar significativamente a velocidade de injeção, à medida que se aumenta a temperatura do molde, pois apareceram zonas com degradação térmica nas peças. A consequência dessa diminuição da velocidade de injeção foi que o material passou mais tempo no interior da moldação logo apresentou maiores percentagens de casca, pois teve mais tempo para criar zonas cristalinas durante a fase de arrefecimento.

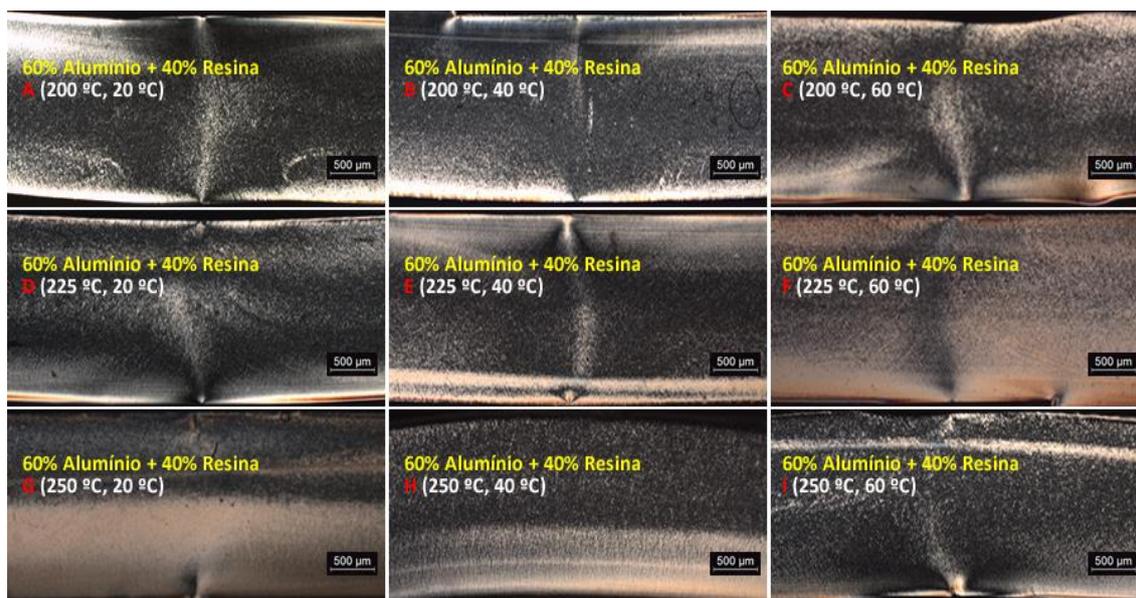


Figura 102 Imagem das cascas dos provetes injetados no bloco moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida.

Tendo por base, as imagens obtidas na figura 102, e recorrendo à medida padrão inserida na imagem microscópica, efetuou-se o cálculo, em percentagem, da casca total na amostra, tal como podemos verificar na tabela 11.

Tabela 11 Resultado das percentagens de casca dos provetes injetados no bloco moldante 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxida.

60% Alumínio + 40% Resina				
Condição	Baixo (µm)	Cima (µm)	Total (µm)	Casca (%)
A (200 °C, 20 °C)	170,37	88,89	259,26	12,96
B (200 °C, 40 °C)	134,32	59,70	194,02	9,70
C (200 °C, 60 °C)	253,73	44,78	298,51	14,93
D (225 °C, 20 °C)	223,88	29,85	253,73	12,69
E (225 °C, 40 °C)	283,58	29,85	313,43	15,67
F (225 °C, 60 °C)	268,66	29,85	298,51	14,93
G (250 °C, 20 °C)	402,99	44,78	447,77	22,39
H (250 °C, 40 °C)	328,36	59,70	388,06	19,40
I (250 °C, 60 °C)	149,25	44,78	194,03	9,70
Média	246,13	48,02	294,15	14,71

De um modo geral, a percentagem de casca é maior no lado da placa da cavidade. Isto pode-se dever ao fato de o último material injetado estar do lado da chapa da cavidade, e o calor do fundido teve tempo para passar para o outro lado da casca.

Como neste caso o tempo de arrefecimento é maior que na placa em aço, o material passa maior tempo no interior do molde, logo tem maior probabilidade de criar cascas com maior dimensão por influência do material quente no seu interior e assim se formem zonas mais quentes no lado da cavidade.

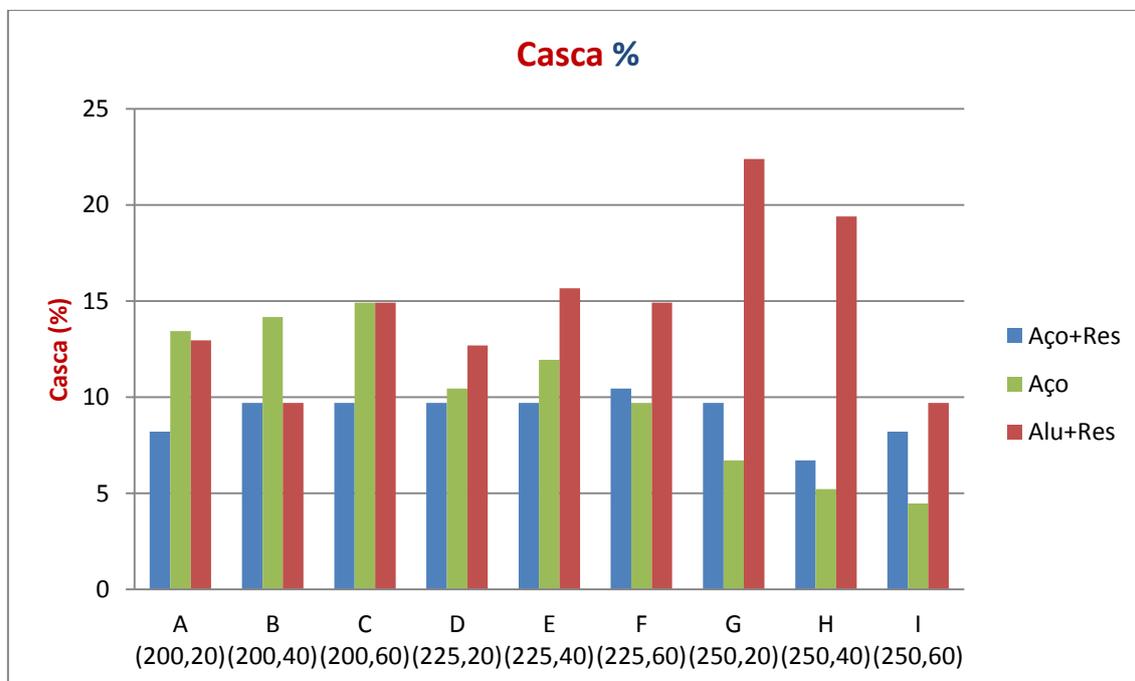


Figura 103 Percentagem de Casca dos provetes injetados nos blocos moldantes.

Poderão existir diversas razões para estas diferenças nas percentagens de casca nos três blocos moldantes. Uma é a redução da velocidade de injeção nas temperaturas de injeção mais elevadas à medida que se aumenta também a temperatura do molde. Como o material passa mais tempo no interior do molde, tem mais tempo para criar zonas cristalinas, logo um consequente aumento da percentagem da casca.

Outro dos fatores pode ser a diferença que existe no design do sistema de arrefecimento entre o bloco moldante 100% em aço e os restantes, os blocos moldante compostos. Isso influencia a fase de arrefecimento do polímero, pois a condutividade térmica dos materiais com resina epóxida é mais baixa, logo há mais perdas de calor ao longo da injeção, o que altera as propriedades mecânicas da peça final.

4.4. Simulação MoldFlow

No que diz respeito às simulações obtidas no software Autodesk MoldFlow Adviser 2014, os resultados obtidos foram, de certa forma, ao encontro dos resultados obtidos na realidade, excetuando os valores elevados que o parâmetro pressão de injeção apresentou na simulação. Esses resultados podem ser observados na tabela 12.

Tabela 12 Valores reais de injeção vs Valores da Simulação no MoldFlow.

	Tinj	Tmolde	Variável	Injeção Real	MoldFlow 2014
A		20	Tempo Injeção (s)	1,10	0,8127
			Pressão de Injeção (MPa)	53,00	37,67
B	200	40	Tempo Injeção (s)	0,98	0,8118
			Pressão de Injeção (MPa)	56,00	37,01
C		60	Tempo Injeção (s)	1,14	0,9266
			Pressão de Injeção (MPa)	57,00	36,33
D		20	Tempo Injeção (s)	1,10	0,8301
			Pressão de Injeção (MPa)	53,00	28,87
E	225	40	Tempo Injeção (s)	1,97	0,9495
			Pressão de Injeção (MPa)	30,00	28,37
F		60	Tempo Injeção (s)	1,92	0,9459
			Pressão de Injeção (MPa)	18,00	27,68
G		20	Tempo Injeção (s)	1,29	0,9523
			Pressão de Injeção (MPa)	23,00	22,78
H	250	40	Tempo Injeção (s)	1,98	0,9495
			Pressão de Injeção (MPa)	17,00	22,21
I		60	Tempo Injeção (s)	1,88	1,066
			Pressão de Injeção (MPa)	7,00	21,69

Pode-se verificar que, à medida que a temperatura de injeção e do molde aumenta, o valor do tempo de injeção vai descendo gradualmente, e o mesmo acontece com o valor da pressão de injeção obtida. Mas na realidade, o valor obtido na realidade é um bocado diferente do resultado da simulação, deve-se ao fato de se ter utilizado valores mais elevados de pressão de injeção, por causa do enchimento total da impressão e de evitar peças com defeitos, tais como chupados e o não enchimento total da peça.

Outra das razões para os valores mais elevados na realidade, é o fato de se ter diminuído bastante a velocidade de injeção, por forma a não haver degradação térmica na peça injetada, daí a discrepância entre os valores reais e os valores da simulação.

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O objetivo principal desta dissertação era realizar uma avaliação do desempenho de blocos moldantes com resina epóxida utilizando diferentes tipos de cargas metálicas, aquando do processo de moldação por injeção. Neste caso, os blocos moldantes em estudo eram constituídos de diferentes materiais: um em aço (o bloco moldante convencional), outro com 15% Fibra Curta de Aço e 85% Resina Epóxida e ainda outro com 60% Pó de Alumínio e 40% Resina Epóxida.

A peça injetada tinha características geométricas próprias, que inclui uma zona com linha de soldadura. Estudaram-se algumas propriedades da peça na linha de soldadura utilizando os diferentes blocos moldantes, e algumas condições de processamento, nomeadamente, as temperaturas de injeção e do molde. Estes valores foram estabelecidos de acordo com a janela operatória do material de injeção selecionado.

Os gráficos de tensão-deformação apresentaram valores muito idênticos entre si, sendo que na tensão máxima o valor é muito idêntico nos casos do bloco moldante 100% em aço e no compósito de 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxida. Excetuando nas últimas condições de processamento deste último, onde se teve de diminuir a pressão de injeção e a velocidade de injeção por forma a evitar a degradação térmica do material no interior da moldação. Por fim, no bloco moldante 60% pó de alumínio + 40% de resina epóxida, os valores da tensão máxima descem ligeiramente, mas com valores muito próximos dos resultados obtidos nos blocos moldantes anteriores, pelo que se pode concluir que os valores da tensão máxima nos três blocos moldantes apresentam valores muito próximos entre si. A única diferença nos três blocos moldante que se pode verificar nas curvas tensão-deformação, é que a deformação é muito maior no bloco moldante 100% em aço, e vai diminuindo nos blocos moldantes compósitos, à medida que se aumenta a temperatura de injeção e do molde.

Regra geral, quando se aumenta a temperatura do molde e mantendo a mesma temperatura de injeção, os resultados da tensão máxima também aumentam, pelo que se pode traduzir numa peça com melhores propriedades e características.

Os resultados apresentados na caracterização mecânica das amostras, em relação ao módulo de elasticidade (E), mostram que à medida que se aumenta a temperatura do molde mantendo a mesma temperatura de injeção, regra geral, o valor do módulo de elasticidade também aumenta, embora o bloco moldante de 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada apresente valores inferiores aos dos blocos moldantes com aço. Isso deve-se ao fato de a temperatura estar mais elevada na frente do fundido, e ao haver a junção na zona de soldadura, irá ter maior eficácia e qualidade.

Os resultados obtidos na percentagem de casca determinam que os valores obtidos nos blocos moldantes com aço ou compósito com aço, apresentam valores muito idênticos de percentagem de casca, com médias muito parecidos, embora o bloco moldante com 15% fibra curta de aço + 85% de resina epóxidada, tenha valores de velocidade de injeção e pressão de injeção mais pequenos que no bloco em aço, derivado da condutividade térmica do compósito. O mesmo acontece no bloco moldante com 60% Pó de Alumínio + 40% Resina Epóxidada, mas como a sua condutividade térmica é menor, daí se justifique os valores ainda maiores de percentagem de casca.

Concluindo, através do processo de moldação por injeção, pode-se recorrer ao uso da prototipagem rápida, e associar essas técnicas ao uso convencional do molde de injeção, tornando a produção de molde mais rápida, mais económica, mas apenas para produção em pequena escala. Para peças com maior detalhe, em grande escala, os moldes híbridos necessitam ainda de um maior conhecimento no processo de fabrico dos materiais que compõem os blocos moldantes, embora já se consiga obter um bom acabamento superficial e boas propriedades mecânicas das peças obtidas.

Para peças com zonas críticas, tal como aconteceu nesta dissertação, a utilização de blocos moldantes compósitos com cargas metálicas e resina epóxidada, necessita de um maior desenvolvimento no que diz respeito aos materiais selecionados, torna-se urgente a procura de novos materiais com melhores condutividades térmicas, embora o aço e o alumínio tenham excelentes propriedades nesse campo, quando misturados com resina, esse valor decresce significativamente, alterando as propriedades mecânicas finais das peças obtidas, mas num cômputo geral, utilizando temperaturas intermédias, tanto de injeção como de molde, consegue-se obter excelentes resultados nas peças injetadas,

pelo que é um processo competitivo com a produção convencional de moldes e muito mais económico, pelo que no setor industrial, certamente se irá impor.

O futuro dos moldes híbridos passará também pela descoberta de novas técnicas de prototipagem rápida para o fabrico dos blocos moldantes. Atualmente as tecnologias de fusão de pós metálicos (SLM) e o vazamento de resina em vácuo são as técnicas possivelmente mais indicadas para a produção de blocos moldantes, conforme se trate de produção de séries longas ou curtas respetivamente. Penso que no futuro se encontrarão novas soluções e métodos de produção mais económicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pontes, A. J., Queirós, M. P., Martinho, P. G., Bártolo, P. J., & Pouzada, A. S. Experimental assessment of hybrid mould performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(5-8), 441–448. - 2010
- [2] Martinho, P. G., Bártolo, P. J., & Pouzada, A. S. - Hybrid moulds: effect of the moulding blocks on the morphology and dimensional properties. *Rapid Prototyping Journal*, 15(1), 71–82. - 2009
- [3] Viana, J., *Tempo de Ciclo*, Processamento de Polímeros II - 2009
- [4] Viana, J., *Moldação por Injeção*, Processamento de Polímeros II - 2009
- [5] Viana, J., *Variáveis do processo de Injeção*, Processamento de Polímeros II - 2009
- [6] Voet, A., Pee, B. V., Mingneau, J., Cardon, L., Houtekier, R. *Optimization of conformal cooling by using new materials and production techniques*. Int. Conf. on Polymers & Moulds Innovations, Ghent, Belgium - PMI 2007
- [7] Oliveira, J., *Morfologia de Polímeros*, Processamento de Polímeros II - 2009
- [8] Viana, J., *Escoamento de Fundidos em Moldes*, Processamento de Polímeros II - 2009
- [9] Viana, J., *Trocas de Calor em Moldes*, Processamento de Polímeros II - 2009
- [10] Martinho, P.G., *Mechanical design of hybrid moulds - Mechanical and thermal performance implications*, in *Institute for Polymers and Composites*, University of Minho: Guimarães. - 2010
- [11] Baretta, D. R., Zeilmann, R. P., Costa, C. A., Pouzada, A. S. *Application of alternative materials in hybrid mould cores - Building the future by innovation*. Marinha Grande, Portugal – RPD 2006
- [12] Peixoto, F. L., Cavalheiro, A. Z., Salmoria, G. V., Ahrens, C. H., Fascin, H. M., Hildebrand, C. P. *Thin wall plastic part design assisted by rapid tooling and cae technologies - Building the future by innovation*. 2006. Marinha Grande, Portugal - 2006
- [13] Nogueira, A. A., *A study on the mouldability of technical parts using hybrid moulds and structural foams*, in *Institute for Polymers and Composites*, University of Minho: Guimarães - 2011
- [14] Pouzada, A. S., *Desenvolvimento e Engenharia de Produto – Factor chave*, 6(1), 1-6 - 2001

- [15] <http://www.izest.com.my/userfiles/image/imgmoldflow02.gif>
- [16] Neves, A.F., Salmoria, G. V., Ahrens, C. H., Pouzada, A. S., 6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering, O. N., *Avaliação das propriedades de peças injetadas com polipropileno e nanoargila em um molde híbrido* - 2011
- [17] Martinho, P. G., *Rapid Tooling* - PAF 5º Ano EM - ESTG Leiria
- [18] Nogueira, A. A., Pouzada, P. S., Martinho, P. G., Pouzada, A. S., *A new way to produce conformal cooling channels by RPT for moulding blocks of the hybrid moulds* - 2010

ANEXO 1 Ficha técnica Biresin L74

Technical Data Sheet
Issued 04/2006

Biresin® L74

Laminating and Multi-purpose resin

Application

- Manufacture of laminates for injection moulds and other temperature resistant moulds
- Manufacture of adhesive appliances
- For laminates with glass or carbon fibres

Properties

- Good soaking and wetting properties
- Good thermomechanical properties and high heat resistance after post curing (24 h / RT) + 3 h / 60°C + 3 h / 140°C
- Application especially in combination with surface resin **Biresin® S19**

Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin **Biresin® L74**, epoxy resin, yellowish-transparent, unfilled, low viscous
- Hardener **Biresin® L74**, amine, colourless-transparent, unfilled, low viscous

Processing Data

	in parts by weight	
Mixing ratio resin to hardener		100 : 17
Mixing viscosity, 25°C	mPas	780
Polife, 500 g / RT	min	120 - 150
Demoulding time, RT	h	24 + post curing

Physical Data (approx.-values)

Biresin® L74 resin	with hardener	Biresin® L74
Density	ISO 1183 g/cm ³	1.1
Shore hardness	ISO 868 -	D 85*
E-Modulus	ISO 178 MPa	23,000* (glass fibre reinforced)
Flexural strength	ISO 178 MPa	120*
Impact resistance	ISO 179 kJ/m ²	17*
Heat distortion temperature	ISO 75B °C	160*

* values after post curing: 3h / 60°C + 3h / 140°C

Delivery

Individual components	Biresin® L74 resin	25 kg net
	Biresin® L74 hardener	4.25 kg; 0.3 kg neto

Tooling & Composites



Biresin® L74
1 / 2

Processing

- The material temperature must be 18 - 25°C.
- After mixing of resin and hardener component it is easily possible to incorporate additives if necessary.
- Biresin® L74 is applied quickly and easily due to its low viscosity. It will easily wet out fibres and incorporate high levels of fillers and powders with high binding force.
- The ratio between resin and selected fibre must be determined and reliably controlled.
- For laminates glass fibres with binding twill are better than binding cloth because of its better suppleness.
- It is advised to lay up a balanced laminate to avoid distortion when de-moulding.
- Void-free glass and carbon fibre laminates are possible by processing under vacuum bag conditions to remove excess air and resin.
- To clean brushes or tools immediately Sika® Reinigungsmittel 5 is recommended.

Storage

- Minimum shelf life is 12 month under room condition (18 - 25°C), when stored in original un-opened containers.
- After prolonged storage at low temperature, crystallisation of components may occur. This is easily removed by warming sufficient time to a maximum of 80°C. Allow to cool to room temperature before use.
- Containers must be closed water tight immediately after use and prevented from moisture. The residual material has to be used up as soon as possible.

Precautions

For information and advice on the safe handling and storage of products, users should refer to the current Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety related data.

Disposal considerations**Product**

Recommendations: Must be disposed of in a special waste disposal unit in accordance with the corresponding regulations.

Packaging

Recommendations: Completely emptied packagings can be given for recycling. Packaging that cannot be cleaned should be disposed of as product waste.

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika-products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users should always refer to the most recent issue of the Technical Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied upon request.

Sika Deutschland GmbH Tel.: +49 (0) 7125 940 492
 Stuttgarter Str. 139 Fax: +49 (0) 7125 940 401
 D - 72574 Bad Urach e-Mail: tooling@de.sika.com
 Germany Internet: www.sika.de





April 2009

ANEXO 2 Ficha técnica Pó de Alumínio Rebelco



REBELCO, Lda Rua São Francisco 786, Parque Doroana, Armazém CG.
2645-019 Alcabideche Portugal
Tel (+351) 214566335, Fax (+351) 214566338 www.rebalco.pt

Pó de Alumínio

DESCRIÇÃO	Pó de alumínio atomizado sem revestimento. Pureza mínima: 99,5 % Forma da partícula: granular
GRAU DE PUREZA	99,5 %
GRANULOMETRIA	> 150 μ : 1 % máx. * < 150 μ : 99 % min. * < 80 μ : 80 % * < 45 μ : 40 % *
DENSIDADE APARENTE	1.2 g/cm ³
TAMANHO MÉDIO DAS PARTÍCULAS	50 μ
APLICAÇÃO	Uso Industrial.

* Valores Médios

Nota: toda a informação constante desta ficha técnica é fornecida de boa fé, sendo baseada em ensaios internos e na nossa experiência prática, não representando no entanto qualquer garantia ou responsabilidade por parte da nossa empresa relativamente a sua aplicação.

ANEXO 3 Silicone HB Flex T4 com o endurecedor HB Flex T4-0, HB Química

 HB QUÍMICA - REPRESENTAÇÕES COMERCIO E SERVIÇOS, LDA Sede: Rua Dr. Joaquim Nogueira dos Santos, 870 - 3º Dtº 4475 - 474 NOGUEIRA DA MAIA		FOLHA TÉCNICA				
Armazém / Escritório: Trav. De Gatões, Amazém A 4460-886 CUSTÓIAS MTS <small>hbarros@netcabo.pt - Capital Social 5.000.00 € - Mat. C. R. C. Maia sob o nº 57910</small> Tlf: 93.9697781 / 22.9542787 Fax: 22.9531156 / 22.9601800						
N.C. 505 435 730		HB FLEX T4/ T4 O A + B				
GENERALIDADES: <p>O HB FLEX T4/T4 O A+B é um Elastómero de Silicone de Recticulação por Adição, à temperatura ambiente, após a mistura perfeita do Componente A com o Componente B.</p> <p>O Elastómero assim obtido, permite obter moldes para vazamento de resinas poliéster, poliuretano, gesso, cera fundida, cimento e outros materiais, proporcionando elevada fidelidade na reprodução de pormenores, bem como, grande facilidade e segurança na utilização. Utilizado para prototipagem rápida.</p> <p>Excelente estabilidade dimensional ao longo do tempo.</p> <p>A fluidez do HB FLEX T4/ T4 O A+B permite trabalhar por vazamento. A mistura dos dois componentes deve ser muito bem feita. Recomenda-se a eliminação do ar retido, numa câmara de vácuo, onde se deixará primeiro que a mistura se expanda completamente e logo se comprima.</p> <p>A não necessidade de desmoldantes, quer no fabrico dos moldes quer na produção das peças moldadas, permite, para além de uma maior rapidez de produção, uma maior fidelidade nas reproduções.</p>						
CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOS DOIS COMPONENTES		PROPOR. DA MISTURA	VISCOSIDADE EM mPa.s	TEMPO DE VIDA ÚTIL DA MISTURA, A 23° C	TEMPO EM CONTACTO COM O ORIGINAL	COR
COMPONENTE A + COMPONENTE B		100 gr	35,000	90 MINUTOS	12 H	TRANSLÚCIDO TRANSLÚCIDO TRANSLÚCIDO
CARACTERÍSTICAS DO ELASTÓMERO HB FLEX T4/T4-0 A+B APÓS UMA SEMANA A 23° C		UNIDADES		VALOR		
DUREZA		Shore A		40		
PESO ESPECÍFICO		gr / ml		1,1		
CONTRACÇÃO LINEAR		%		< 0,1		
ALONGAMENTO À RUPTURA		%		375%		
RESISTÊNCIA À RASGAGEM		kN /m		32		

ANEXO 4 Ficha técnica Total Petrochemicals PPH 5060



TOTAL PETROCHEMICALS Polypropylene PPH 5060

TOTAL PETROCHEMICALS - Polypropylene Homopolymer

Tuesday, June 03, 2014

General Information			
Product Description			
Polypropylene PPH 5060 is homopolymer with a Melt Flow Index of 6 g/10 min. Polypropylene PPH 5060 is specially suitable for tape extrusion for woven applications and for extrusion thermoforming. Polypropylene PPH 5060 is also a general purpose injection grade for moulding technical items			
General			
Material Status	• Commercial: Active		
Availability	• Europe		
Features	• General Purpose		
Uses	• General Purpose	• Tape	
Agency Ratings	• EC 1907/2006 (REACH)		
RoHS Compliance	• RoHS Compliant		
Forms	• Pellets		
Processing Method	• Extrusion	• Injection Molding	• Thermoforming
ASTM & ISO Properties			
Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.905 g/cm ³	0.905 g/cm ³	ISO 1183
Apparent Density	0.53 g/cm ³	0.53 g/cm ³	ISO 60
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16 kg)	6.0 g/10 min	6.0 g/10 min	ISO 1133
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus	218000 psi	1500 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress (Yield)	4640 psi	32.0 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Yield)	10 %	10 %	ISO 527-2
Flexural Modulus	203000 psi	1400 MPa	ISO 178
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Charpy Notched Impact Strength (73°F (23°C))	2.4 ft-lb/in ²	5.0 kJ/m ²	ISO 179
Notched Izod Impact Strength (73°F (23°C))	1.9 ft-lb/in ²	4.0 kJ/m ²	ISO 180
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Rockwell Hardness (R-Scale)	92	92	ISO 2039-2
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Heat Deflection Temperature			
66 psi (0.45 MPa), Unannealed	212 °F	100 °C	ISO 75-2/B
264 psi (1.8 MPa), Unannealed	131 °F	55.0 °C	ISO 75-2/A
Vicat Softening Temperature			
--	302 °F	150 °C	ISO 306/A50
--	185 °F	85.0 °C	ISO 306/B50
Melting Temperature (DSC)	327 °F	164 °C	ISO 3146



www.ides.com

UL and the UL logo are trademarks of UL LLC © 2014. All Rights Reserved.
The information presented on this datasheet was acquired by UL Prospector from the producer of the material. UL Prospector makes substantial efforts to assure the accuracy of this data. However, UL Prospector assumes no responsibility for the data values and strongly encourages that upon final material selection, data points are validated with the material supplier.

Page: 1 of 1

ANEXO 5 Ficha técnica Ferromatik Milacron K85-S



K 85 S/2F		Dados Técnicos				1
Tipo de Máquina		K 40	K 60	K 85/2F	K 110	
Máquina-Nº		510 ... versão	515 ... versão	521 229 versão S	525 ... versão	
Ano de fabrico		1999	1999	1999	1999	
Força de fecho	kN	400	600	850	1100	
Versão de commando		IQT ..	IQT ..	IQT 33	IQT ..	
Unidade de Injecção						
Diâmetro do fuso	mm			40 / 25		
Pressão de injecção	bar			2240 / 2254		
Volume de injecção	cm ³			201 / 49		
Curso do fuso	mm			160 / 100		
Potência de aquecimento instalada	kW			12,7 / 8,3		
Nº de zonas de aquecimento				5 / 4		
Unidade de Fecho						
Força de fecho	kN	400	600	850	1100	
Curso de abertura do molde	mm	350	420	550	550	
Altura min. de molde	mm	200	200	450	250	
Distância máx. entre pratos	mm	550	620	1000	800	
Distância interior máx. entre colunas	mm	320 x 320	355 x 355	420 x 420	470 x 470	
Dados Gerais						
Potência da bomba	kW	11	15	30	22	
Potência total instalada	kW			58	...	
Dimensões da máquina	m	3,5 x 1,4 x 1,8	3,9 x 1,4 x 1,8	5,0 x 1,6 x 3,4	5,0 x 1,6 x 2,0	
Capacidade do tanque de óleo	l	175	190	290	290	
Peso neto (sem óleo)	kg	2600 Versão E 2800 Versão S	3000 Versão E 3300 Versão S	6100 Versão S	5200 Versão E 5500 Versão S	

