



Departamento  
de Engenharia Mecânica

---

## **Otimização de injeção sobre tecidos pré-impregnados**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

**Autor**

**Pedro José da Silva Carreira**

**Orientador**

**Urbano Manuel Oliveira Ramos**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2013**

## AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos são dirigidos a todos os que me apoiaram direta ou indiretamente durante a realização deste trabalho.

Ao orientador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, o Professor Doutor Urbano Manuel Oliveira Ramos, pelo acompanhamento e pela ajuda prestada durante o decorrer dos trabalhos.

Ao Professor Doutor Nuno Manuel Fernandes Alves, pela confiança, pelo acompanhamento e pela oportunidade de integrar a bolsa de investigação que me permitiu efetuar este trabalho.

Ao Professor Doutor Artur Jorge dos Santos Mateus, pela originalidade de ideias que permitiram desenvolver esta dissertação.

Ao diretor do Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto, o Professor Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo, pela oportunidade de integrar a equipa de trabalho e de desenvolver todo o trabalho de investigação no CDRsp.

Aos colegas de trabalho e amigos Cyril, David e Tiago, pelas horas de trabalho que passamos juntos.

E principalmente à minha esposa e família.

## RESUMO

A otimização é aplicada constantemente como método de aperfeiçoamento, desde os problemas quotidianos, aos problemas mais complexos de matemática e engenharia. A Natureza há milhões de anos que aplica eficazmente otimização em todos os seus ínfimos sistemas de forma a manter o equilíbrio. Estes processos naturais de aperfeiçoamento serviram de inspiração a diversos autores para o desenvolvimento de algoritmos de otimização. Quatro algoritmos bio-inspirados, na sua forma de otimização mono-objetivo e um algoritmo multi-objetivo são utilizados para efetuar otimização do problema do ciclo de injeção.

A indústria dos moldes como conhecida pioneira no desenvolvimento tecnológico, necessita de constante aperfeiçoamento e otimização dos seus processos. A redução do tempo de ciclo é um dos principais focos de otimização pois determina fortemente o custo da peça a produzir. A procura de novos conceitos de injeção, em que se pretende produzir peças com gradientes funcionais, levaram à criação de uma nova ferramenta molde para o processamento de tecidos pré impregnados com polímero (prepreg). A introdução de novas etapas no ciclo de injeção, criaram a necessidade de uma nova formulação, de forma a modelar o processamento dos prepregs.

A otimização efetuada pelos algoritmos bio-inspirados à nova formulação pretende minimizar o tempo de ciclo e obter parâmetros de processamento ideais, tais como as dimensões ideais dos canais de alimentação temperaturas e pressões de processamento. A otimização mono-objetivo tem um único objetivo, a minimização do tempo de ciclo. A otimização multi-objetivo tem como objetivos a minimização do tempo de ciclo, da queda de pressão e volume de abastecimento.

Para que o princípio da sobre moldação fosse aplicado a esta nova técnica de processamento, são apresentados os métodos existentes, para que se possa criar um paralelismo e prever a adesão do polímero ao tecido. Da mesma forma é apresentado o estudo efetuado sobre a compatibilidade de materiais e as suas condições de processamento.

Como resultado final, surge a ferramenta que permite a sobre-moldação, ou seja, o molde projetado, respeitando as dimensões e parâmetros obtidos pelo melhor resultado dos algoritmos mono-objetivo.

**Palavras chave:** otimização, otimização mono-objetivo, otimização multi-objetivo, algoritmos bio-inspirados, moldes de injeção, injeção de polímeros, injeção multi-material, *overmoulding*, prepregs, peças plásticas, gradientes funcionais.

## ABSTRACT

The optimization process is applied constantly as an improvement method from every day's problems to more complex problems in mathematics and engineering. Since millions of years ago that Nature effectively applies optimization in all its systems in order to maintain balance. These natural processes of improvement served as inspiration for several authors for the development of optimization algorithms. Four bio-inspired algorithms, in the form of mono-objective optimization and one multi-objective algorithm are used in the optimization of the injection cycle problem.

The mold industry known as a pioneer in technological development needs constant improvement and optimization of their processes. Reducing the cycle time is a major focus of optimization as strongly determines the cost of the part to produce. The search for new injection concepts, where it is desired to produce parts with functional gradients led to the creation of a new mold tool for the processing of fabric pre-impregnated with polymer (prepreg). The introduction of new stages in the injection cycle has created a need for new formulation in order to model the processing of prepregs.

The optimization performed by the bio-inspired algorithms for the new formulation aims to minimize cycle time and achieve optimum processing parameters such as the dimensions of the ideal feeding channels, processing temperatures and pressures. The mono-objective optimization has one goal, minimizing cycle time. The multi-objective optimization aims at minimizing the cycle time, pressure drop and feed volume.

In order to perform the overmoulding procedure to this new processing technique, the existing traditional methods are presented. This way a parallelism can be created to predict the adhesion of the polymer to the fabric. Similarly is presented the study done on the compatibility of materials and their processing conditions.

As a final result the tool that allows overmoulding is presented, which was projected with the dimensions and parameters achieved by the best performing mono-objective algorithm.

**Keywords:** optimization, mono-objective optimization, multi-objective optimization, bio-inspired algorithms, injection molding, polymers injection, multi-material injection, overmoulding, prepregs, plastic parts, functional gradient.

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE.....	v
SIMBOLOGIA .....	xii
ABREVIATURAS .....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.2. Estrutura da dissertação .....	2
2. OTIMIZAÇÃO.....	4
2.1. Algoritmos deterministas e não deterministas .....	4
2.2. Otimização Continua e Otimização discreta.....	4
2.3. Ótimo local, Global.....	4
2.4. Convexidade e Concavidade.....	5
2.5. Heurística e Meta-heurística .....	5
2.6. Algoritmos Evolucionários .....	6
2.7. Princípio de dualidade .....	7
2.8. Otimização Mono-objetivo .....	7
2.8.1. Formulação matemática Mono-objetivo.....	7
2.9. Otimização Multi-Objectivo .....	8
2.9.1. Formulação matemática Multi-objectivo .....	8
2.9.2. Conceito de Dominância .....	10
2.9.3. Frente não Dominada.....	11
2.9.4. Níveis de Dominância .....	12
2.9.5. Frente local e Frente Global .....	13
2.10. Métodos para lidar com constrangimentos.....	14
2.10.1. Ignorar soluções não possíveis .....	15
2.10.2. Função Penalti.....	15
2.10.3. Torneio Binário.....	16
2.11. Algoritmos Inspirados na Natureza.....	16

---

3.	ALGORITMOS MONO-OBJETIVO INSPIRADOS NA NATUREZA .....	18
3.1.	Algoritmos Genéticos .....	18
3.2.	Algoritmo Colonia Artificial de Abelhas.....	19
3.3.	Firefly Algorithm .....	21
3.4.	Particle Swarm Algorithm .....	23
3.5.	Parâmetros de controlo dos algoritmos.....	24
3.5.1.	Algoritmo Genético .....	25
3.5.2.	Algoritmo Colónia Artificial de Abelhas .....	25
3.5.3.	Algoritmo dos Pirlampos.....	25
3.5.4.	Algoritmo PSO .....	26
4.	PROGRAMAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO .....	27
4.1.	Descrição do Algoritmo.....	27
5.	CICLO DE INJEÇÃO .....	32
5.1.	Modos de execução do ciclo moldação .....	32
5.2.	Fases do ciclo de moldação.....	32
5.3.	Formulação matemática do ciclo de Injeção.....	36
5.3.1.	Formulação do problema Mono-objetivo .....	36
5.3.2.	Constrangimentos ao problema .....	41
5.3.1.	Formulação do problema Multi-objectivo.....	43
6.	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	44
6.1.	Polímeros termoplásticos .....	44
6.2.	Poliamida (PA) .....	46
6.2.1.	Propriedades .....	47
6.2.2.	Principais aplicações.....	48
6.2.3.	Processamento por injeção .....	49
6.3.	Poli-eter-eter-cetona (PEEK).....	51
6.3.1.	Propriedades .....	51
6.3.2.	Principais aplicações.....	52
6.3.3.	Processamento por injeção .....	53
6.4.	Tecidos Pré-impregnados .....	54
6.4.1.	Aplicações .....	54
6.4.2.	Apresentação .....	55

---

---

6.4.1.	Pré-impregnados em fio e tecidos unidirecionais.....	55
6.4.1.	Pré-impregnados em tecido bidirecional ( <i>2D fabric</i> ).....	56
6.4.1.	Pré-impregnados em entrelaçado ( <i>Braids</i> ).....	57
6.4.1.	Tecidos Multi-direcionais.....	59
6.4.1.	Condições de Processamento.....	60
7.	INJEÇÃO MULTI-MATERIAL.....	62
7.1.	Injeção Com Sistemas Valvulados.....	62
7.1.1.	Acionamento e Controlo do fluxo.....	62
7.1.2.	Redução do desperdício de material.....	63
7.1.3.	Redução do tempo de ciclo.....	63
7.1.4.	Injeção a baixa pressão.....	63
7.1.5.	Qualidade das peças injetadas.....	64
7.2.	Injeção Sequencial.....	64
7.3.	Injeção Multi-material.....	66
7.4.	Co-Injeção.....	67
7.5.	Injeção sobre película “ <i>Overmolding</i> ”.....	68
7.5.1.	Vantagens da injeção sobre película.....	69
7.5.2.	Injeção sobre filme ( <i>In Mold Decoration-IMD</i> ).....	69
7.5.3.	Injeção sobre filme posição ( <i>Film Insert Molding - FIM</i> ).....	70
7.5.4.	Injeção sobre filme elastómero.....	70
7.5.5.	Injeção sobre Tecido.....	71
7.6.	Seleção de Materiais.....	73
7.7.	Tecnologias de Injeção e Transferência.....	75
7.7.1.	Injeção com várias máquinas.....	75
7.7.2.	Injeção com máquina com várias unidades de injeção.....	75
7.7.3.	Molde Rotativo.....	75
7.7.1.	Molde com chapa Indexada.....	76
7.7.1.	Molde com Bucha Retráctil.....	77
7.8.	Configurações das máquinas de Injeção.....	78
7.8.1.	Máquinas Paralelas.....	78
7.8.2.	Máquinas Perpendiculares.....	78
7.8.3.	Máquinas Verticais.....	79

---

---

7.8.4. Máquinas Paralelas por cima/baixo .....	79
8. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO .....	80
8.1. Resultados da Otimização Mono-objetivo.....	80
8.1.1. Análise da convergência.....	81
8.1.2. Análise da robustez.....	82
8.1.3. Análise da Simplicidade .....	83
8.1.4. Dispersão das variáveis .....	83
8.1.5. Análise da otimalidade .....	86
8.2. Resultados da Otimização Multi-objectivo.....	88
8.3. Comparação dos resultados da Otimização Mono /Multi-objetivo .....	90
9. FERRAMENTA MOLDE.....	92
9.1. Peça plástica.....	92
9.2. Estrutura do Molde .....	93
9.3. Sistema de Injeção .....	93
9.4. Sistema de aquecimento e de arrefecimento.....	93
9.5. Abertura do molde e extração da peça.....	94
9.1. Monitorização e controlo do ciclo de injeção .....	96
10. SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO .....	97
11. CONCLUSÃO .....	98
12. TRABALHOS FUTUROS.....	99
13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100
14. ANEXOS.....	105
14.1. Anexo 1 – Soluções do problema multi-objetivo.....	106

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 2-1- Função não convexa .....	5
Figura 2-2- Função Convexa .....	5
Figura 2-3- Espaço das variáveis de projeto e correspondente espaço dos objetivos .....	9
Figura 2-4 - Representação das soluções no espaço das soluções.....	11
Figura 2-5- Representação das soluções no espaço das soluções.....	12
Figura 2-6- Níveis das frentes de Pareto. ....	13
Figura 2-7 - Frente ótima de Pareto local e global .....	14
Figura 3-1 – Fluxograma Algoritmo Genético .....	19
Figura 3-2 – Fluxograma do Algoritmo Colônia Artificial de Abelhas .....	21
Figura 3-3 – Fluxograma do Algoritmo dos Pirilampos .....	22
Figura 3-4 – Fluxograma do Algoritmo de Enxame de Partículas .....	24
Figura 4-1 – Representação dos Constrangimentos. ....	29
Figura 4-2 – Representação binária de dois indivíduos.....	29
Figura 4-3 – Representação binária de dois indivíduos após cruzamento.....	30
Figura 4-4 – Representação binária de um indivíduo antes e depois da mutação. ....	30
Figura 4-5 – Representação da convergência. ....	31
Figura 5-1 - Ciclo de Moldação (Centimfe, 2003). ....	34
Figura 5-2 - Canal de Injeção Submarina .....	35
Figura 6-1 – Pirâmide dos polímeros. (Goodship, 2004) .....	45
Figura 6-2 - Materiais amorfos (A) e Semi-cristalinos (B). (Goodship, 2004).....	45
Figura 6-3 - Estrutura da PA 6 (A) e Estrutura da PA 6.6 (B). (Goodship, 2004) .....	46
Figura 6-4 – Exemplos de aplicações dos tecidos pré impregnados. (Laminates, 2012) .....	55
Figura 6-5 – Bobines de fio (A) e tecido unidirecional (B) (Shappe, 2012). ....	55
Figura 6-6 – Rolos de tecido (A) e placas de tecido (B) (Shappe, 2012). ....	57
Figura 6-7 – Pormenor do entrelaçado (A) e Rolos de mangas de entrelaçado (B) (Shappe, 2012). ....	58
Figura 6-8 – Rolo de tecido multi-direcional (A) e Pormenor do tecido (B) (Shappe, 2012)..	59
Figura 6-9 - Condições de processamento para PA12 (Shappe, 2012). ....	60
Figura 6-10 - Condições de processamento para PEEK (Shappe, 2012). ....	60
Figura 7-1 Avanço da frente de fluxo (Goodship, 2004). ....	65
Figura 7-2 Representação de sistema sequencial de injeção (Goodship, 2004). ....	66
Figura 7-3 – Representação da estrutura Sandwich obtida por co-injeção.....	67
Figura 7-4 – Representação da estrutura Sandwich obtida por co-injeção.....	68
Figura 7-5 – Injeção sobre filme representativo de madeira (Summerer, 2009). ....	69
Figura 7-6 – Injeção sobre filme com abastecimento por rolo (Kurtz, 2012) .....	70
Figura 7-7 – Injeção sobre elastómero (Müller, 2012). ....	71
Figura 7-8- Etapas da injeção sobre tecido.....	71
Figura 7-9- Colocação de tecido em máquina de Injeção (Summerer, 2009). ....	72
Figura 7-10- Peça obtida por Injeção sobre Tecido (Love & Goodship, 2002). ....	73
Figura 7-11- Tabela de Compatibilidade de Materiais (Goodship, 2004). ....	74

Figura 7-12- Molde Rotativo (Goodship, 2004).....	76
Figura 7-13- Molde com bucha retrátil (Goodship, 2004). ....	77
Figura 7-14- Configurações de Máquinas de Injeção Multi-material (Goodship, 2004). ....	78
Figura 8-1- Gráficos de convergência (A)GA, (B)ABC. ....	81
Figura 8-2- Gráficos de convergência (A)FA, (B)PSO.....	81
Figura 8-3- Gráfico de convergência PGA.....	82
Figura 8-4- Dispersão das variáveis em 400 gerações (A)GA, (B)ABC. ....	84
Figura 8-5- Dispersão das variáveis em 400 gerações (A)FA, (B)PSO. ....	84
Figura 8-6- Dispersão das variáveis em 400 gerações GPA. ....	85
Figura 8-7- Dispersão das variáveis em 50 execuções (A)GA, (B)ABC. ....	85
Figura 8-8- Dispersão das variáveis em 50 execuções (A)FA, (B)PSO.....	86
Figura 8-9- Dispersão das variáveis em 50 execuções GPA. ....	86
Figura 8-10- Frente de Pareto da Queda de pressão (1) vs Tempo de ciclo (2) . ....	88
Figura 8-11- Frente de Pareto da Queda de pressão (1) vs Volume de enchimento (3) . ....	89
Figura 8-12- Frente de Pareto da Tempo de ciclo (2) vs Volume de enchimento (3) . ....	89
Figura 8-13- Dispersão das variáveis de projeto para as 3 funções objetivo. ....	90
Figura 9-1 - Canal de Injeção. ....	92
Figura 9-2 – Peça plástica com canal de Injeção (A); Secção da peça plástica com tecido (B). .....	93
Figura 9-3 – Sistemas de refrigeração e aquecimento. ....	94
Figura 9-4 – Cinemática da abertura e extração da peça. ....	95
Figura 9-5 – Sistema de trinco e arrastador. ....	95
Figura 9-6 – Localização dos sensores. ....	96
Figura 10-1 – Malha para simulação em <i>Moldflow</i> (A); Resultado do tempo de enchimento (B). ....	97

## INDICE DE QUADROS

Quadro 3-1– Parâmetros de controlo do GA.....	25
Quadro 3-2– Parâmetros de controlo do ABC.....	25
Quadro 3-3– Parâmetros de controlo do FA.....	25
Quadro 3-4– Parâmetros de controlo do PSO. ....	26
Quadro 6-1– Propriedades das Poliamidas (densidade e % de absorção de água).....	47
Quadro 6-2– Propriedades técnicas das Poliamidas (Ashby & Jonhson, 2002).....	48
Quadro 6-3– Temperaturas de processamento das Poliamidas (Goodship, 2004).....	50
Quadro 6-4– Propriedades técnicas do PEEK (Ashby & Jonhson, 2002).....	52
Quadro 6-5– Propriedades mecânicas de fios e fitas UD (Shappe, 2012).....	56
Quadro 6-6– Propriedades específicas dos fios (Shappe, 2012). ....	56
Quadro 6-7– Propriedades das fitas unidireccionais produzidas a partir fios. (Shappe, 2012)..	56
Quadro 6-8– Propriedades das fitas unidireccionais produzidas a partir fios. (Shappe, 2012)..	57
Quadro 6-9 – Propriedades dos tecidos 2D (Shappe, 2012).....	57
Quadro 6-10 – Propriedades dos Entrelaçados (Shappe, 2012). ....	58
Quadro 6-11 Propriedades dos tecidos multi-direccionais produzidos a partir de fios (Shappe, 2012).....	59
Quadro 6-12 Propriedades dos tecidos multi-direccionais produzidos a partir de fibras soltas (Shappe, 2012).....	60
Quadro 8-1 – Intervalos das variáveis de projeto. ....	80
Quadro 8-2 – Resumo de tempo algoritmos mono-objetivo. ....	83
Quadro 8-3 – Soluções ótimas algoritmos mono-objetivo.....	87
Quadro 8-4 – Soluções ótimas das variáveis de projeto e função objetivo para algoritmos mono-objetivo.....	87
Quadro 8-5 – Comparação de resultados entre mono/multi-objetivo. ....	91
Quadro 14-1 – Soluções do problema multi-objetivo. ....	106

## SIMBOLOGIA

$A_{ext}$  - Área exterior da bucha

$A_{int}$  - Área interna da bucha

$A_{proj}$  - Área projetada

$A_c$  - Área de contacto

$a_e$  - Aceleração da Extração

$C$  - Constante de integração

$C_p$  - Calor específico

$CTE$  - Coeficiente de expansão térmica

$d_{release}$  - Dimensão da abertura do molde

$d_{runner}$  - Diâmetro do canal

$d_e$  - Curso de extração

$D$  - Dimensão do problema - Numero de variáveis

$E$  - Módulo de elasticidade do material plástico

$esp$  - Espaço percorrido pela peça

$f$  - Coeficiente de fricção do material plástico

$F_{ext}$  - Força de extração

$F_{clamp}$  - Força de fecho da máquina de injeção

$F_{ref}$  - Força de referência de uma tonelada

$h$  - Coeficiente de convecção térmica

$I$  - Intensidade de luz

$I_0$  - Intensidade da luz inicial

$k$  - Valor aleatório

$k_v$  - Viscosidade de referência do polímero à temperatura de processamento

$\ell_{gate}$  - Comprimento do leque de enchimento

$\ell_{runner}$  - Comprimento dos canais de injeção

$\ell_{part}$  - Comprimento da peça plástica

$Limit$  - Parâmetro limitador

$L$  – Comprimento do sistema de abastecimento

$L_B$  - Comprimento da bucha

MR – Percentagem de Modificação

$m_e$  – Massa da extração

$m_{part}$  – Massa da peça plástica

$m_{feed}$  – Massa dos canais de abastecimento

$MaxOpen$  – Máxima abertura do Molde

$MaxY$  - Dimensão máxima no eixo  $Y$

$N$  – Número máximo de iterações

$n$  - Índice de potência da “Power law”

$n$  – Dimensão da população

$n_{ramif}$  - Número de ramificações do canal de injeção

$n_{gate}$  - Número de pontos de injeção

$P_{inj}$  – Pressão de injeção

$P_R$  - Potência fornecida

$Q_{melt}$  – Caudal de material plástico

$Q_h$  - Calor fornecido

$Q_m$  – Calor acumulado

$Q_c$  – Calor perdido

$r$  – Distância entre dois pirilampos

$R$  – Valor aleatório

$sec$  – Fator de segurança

$SN$ - Número de posições de alimento

$SPP$  – Período de reconhecimento

$S_{gate}$  - Altura máxima do leque de abastecimento

$\bar{S}_{gate}$  – Altura média do leque de abastecimento

$t_{fabric}$  – Tempo de colocação do tecido

$t_{close}$  – Tempo de fecho do molde

$t_{heat}$  – Tempo de aquecimento

$t_{fill}$  – Tempo de enchimento

$t_{pack}$  – Tempo de empacotamento

$t_{cool}$  – Tempo de arrefecimento

$t_{ext}$  – Tempo de extração

$t$  – Espessura da parede máxima da peça plástica

$T_{cool}$  – Temperatura de refrigeração

$T_{melt}$  – Temperatura de Processamento

$T_{demol}$  – Temperatura de desmoldação

$T_{\infty}$  - Temperatura ambiente

$T(t)$  - Temperatura a qualquer instante de tempo

$v$  – Possível posição de alimento

$vel$  - Velocidade de deslocamento do braço mecânica

$v_i$  – Vetor das velocidades

$v_{max}$  – Velocidade máxima

$\bar{v}_F$  - Velocidade da frente de fluxo

$V_{part}$  – Volume da peça

$V_{feed}$  – Volume dos canais de enchimento

$V_{open}$  – Velocidade de abertura da máquina de injeção

$\dot{V}$  - Caudal de material plástico

$w_{gate}$  – Largura do leque de injeção

$Z_{part}$  – Dimensão máxima da peça no sentido da desmoldação

$\varphi$  – Valor aleatório

$\varphi_{dim}$  - Constante referente à dimensão da peça

$\gamma$  - Coeficiente de absorção de luz

$\dot{\gamma}_{max}$  - Tensão máxima de corte do material plástico

$\alpha$  – Parâmetro de controlo de movimento

$\alpha_{ine}$  – Inércia

$\alpha_{dif}$  – Difusividade Térmica

$\beta$  – Parâmetro de atração

$\beta_0$  – Atração no ponto inicial

$\beta_1$  – Valor real no intervalo [0.1]

$\beta_2$  – Valor real no intervalo [0.1]

$\beta_{gate}$  – Ângulo do leque de enchimento

$\Delta P$  – Queda de pressão

$\mu$  – Coeficiente de atrito estático

$\theta$  - Ângulo de saída com a direção da extração

$\theta_p$  - Solução particular da equação diferencial

$\theta(t)$  - Temperatura a qualquer instante de tempo no interior do molde

$\rho_{mat}$  – Densidade do material plástico

$\rho$  - Densidade do material metálico

$v$  - Relação entre o comprimento e diâmetro máximo

$\eta_{aev}$  - Viscosidade aparente efetiva

**ABREVIATURAS**

ABC – Artificial Bee Colony

AE - Algoritmos Evolucionários

BA – Bee Algorithm

CI - Co Injeção

CS – Cuckoo Search

EE – Estratégias Evolucionárias

FA – Firefly Algorithm

FIM - Film Insert Molding

GA – Genetic Algorithms

HBC – Honey Bee Algorithm

IMD - In Mold Decoration

LF - Levy Flight

PA – Poliamida

PA 6 – Poliamida 6

PA 6.6 – Poliamida 6.6

PA 12 – Poliamida 12

PAEK- Poliariletercetona

PE - Programação Evolucionária

PEEK- Poli-eter-eter-cetona

PGA – Programmed Genetic Algorithm

Prepreg – Tecido Pré-Impregnado

PSO – Particle Swarm Optimization

RN – Redes Neurais

TPO - Olefinic thermoplastic elastomer film

## 1. INTRODUÇÃO

Não é exagero dizer que nos dias de hoje a otimização está presente em tudo o que nos rodeia. Desde os problemas matemáticos mais complexos, problemas de engenharia, traçado de rotas, planeamento empresarial até aos problemas mais básicos do quotidiano, como planear as férias ou gerir as compras no supermercado a otimização é de certa forma aplicada. Seja qual for o problema a analisar, o que é pretendido é maximizar ou minimizar algo, ou seja, atingir determinado objetivo da melhor forma possível. Este objetivo pode ser maximizar um lucro, minimizar uma despesa, gerir o tempo disponível para uma determinada operação ou atingir um nível de perfeição em determinado objeto com os recursos disponíveis. A otimização tem implícito o obter de um objetivo à custa de determinados parâmetros que controlam o resultado final.

A Natureza executa constantemente otimização desde a sua origem, de forma a manter o equilíbrio. A busca de aperfeiçoamento natural, serviu a diversos autores de inspiração para o desenvolvimento de ferramentas matemáticas de pesquisa e otimização. A imitação do quotidiano ou a luta pela sobrevivência de espécies animais levaram ao desenvolvimento de algoritmos de otimização que atualmente são aplicados nas mais diversas áreas inclusive nas tecnológicas.

Um grande impulsionador de desenvolvimento tecnológico, de máquinas e mesmo de aplicações computacionais em Portugal é a indústria de moldes para a injeção de polímeros. Desde o seu início na década de 50, que tem sofrido constante aperfeiçoamento e otimização à custa do conhecimento empírico. Fruto da competição mundial, ferramentas de excelente qualidade, são cada vez mais exigidas, de forma a obter peças com elevado rigor dimensional, estrutural e acabamento superficial.

Os polímeros tomam cada vez mais o seu lugar de destaque em todas as áreas, sendo mesmo utilizados para substituir peças normalmente fabricadas em materiais metálicos. Apesar de estruturalmente menos resistentes que os materiais metálicos, novos conceitos de reforços são necessários, de forma a impulsionar ainda mais o uso de polímeros. O conceito apresentado nesta dissertação pretende unificar a termoformação com a injeção sobre tecido de forma a obter peças com gradientes funcionais produzidas apenas por um molde. Esta urgência em obter peças de excelência em material polimérico obriga a que as ferramentas, os moldes, também o sejam.

Desta forma, a simulação e a otimização do produto ainda na fase de projeto, é cada vez mais um fator de elevada importância, pois permite antever resultados sem que sejam efetuados custos em material e em processos tecnológicos. Na indústria dos moldes tal como noutros meios tecnológicos, o conhecimento empírico é lentamente substituído pelo conhecimento científico, no entanto a maior parte das operações continuam a ser executadas recorrendo à experiência adquirida ao longo dos anos de trabalho.

## 1.1. Objetivos

A indústria dos moldes tem atualmente um grande papel na economia do país, e teve desde sempre um grande sucesso a nível mundial, sendo mesmo um dos países preferidos para a produção de moldes para a indústria automóvel, devido ao elevado rigor técnico e desenvolvimento tecnológico que foi apresentando ao longo dos anos.

A apresentação de novas tecnologias e processos foram cativando os grandes produtores mundiais, principalmente da indústria automóvel, e mais recentemente da indústria aeronáutica e médica.

Perante este cenário de constante exigência de aperfeiçoamento, os objetivos que se pretendem atingir nesta dissertação são os seguintes:

- (i) Estudo dos processos de otimização, formulação matemática e conceitos de análise.
- (ii) Estudo de algoritmos de otimização bio inspirados. A escolha dos algoritmos bio inspirados deve-se ao facto da sua eficácia em outras áreas tecnológicas e por estes algoritmos serem inspirados em processos que são otimizados diariamente pela Natureza.
- (iii) Programação de um algoritmo genético para futuros trabalhos onde seja possível ter total controlo sobre o código fonte para que se proceder à sua adaptação mais eficaz a processos tecnológicos.
- (iv) Formulação matemática de um novo conceito de injeção sobre tecido pré impregnado, juntando duas tecnologias já existentes num único processo.
- (v) Aplicação dos algoritmos à nova formulação matemática do tempo de ciclo e análise de resultados.
- (vi) Desenvolvimento de uma ferramenta molde a partir dos dados recolhidos na otimização.

## 1.2. Estrutura da dissertação

A dissertação apresentada tem duas partes principais que se dividem ao longo de 13 capítulos no total.

A primeira parte é referente à otimização, aos conceitos de análise e aos algoritmos aplicados. O capítulo 2 é dedicado à otimização em geral, aos conceitos mínimos necessários para que se execute uma análise eficaz de otimização. Este capítulo está dividido em otimização mono e multi-objetivo onde se faz a formulação matemática e se apresentam os conceitos associados a cada um destes métodos. Num dos subcapítulos são apresentados alguns métodos utilizados para lidar com constrangimentos. No capítulo 3 são apresentados os algoritmos bio inspirados que foram utilizados para executar a otimização. A sua formulação, o método de funcionamento e os parâmetros de controlo de cada um são também apresentados. O capítulo 4 tem presente o algoritmo programado, onde são apresentadas as decisões tomadas e o método de funcionamento do mesmo.

A segunda parte desta dissertação é referente ao processo tecnológico de injeção e projeto de moldes. No capítulo 5 é feita a nova formulação matemática para a injeção de polímeros sobre tecidos pré impregnados. No capítulo 6 é feita a caracterização e apresentação de propriedades dos materiais que se pretendem utilizar. Pretende-se neste capítulo demonstrar as elevadas características mecânicas dos materiais utilizados e a compatibilidade entre eles, uma vez que se pretendem obter peças em multi-materiais. No capítulo 7 são descritas as tecnologias e as características de cada uma que existem atualmente para se obterem peças em multi-material.

No capítulo 8 são apresentados os resultados da otimização. Primeiro o resultado da otimização mono-objetivo e depois o resultado da otimização multi-objetivo. É apresentado também um quadro resumo com os resultados de todas as análises efetuadas para a função objetivo de tempo de ciclo.

No capítulo 9 é feita a descrição da ferramenta molde protótipo projetada para processar os tecidos pré-impregnados num único ciclo.

A dissertação apresentada está englobada no âmbito de dois projetos financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/EME-PME/108188/2008 e Pest-OE/EME/UI/4044/2011. O trabalho foi desenvolvido no CDRsp (Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto) no âmbito de uma bolsa de investigação designada *Optimalmould* que consistiu no desenvolvimento de uma plataforma integrada de otimização de moldes e parâmetros de injeção de polímeros.

## 2. OTIMIZAÇÃO

### 2.1. Algoritmos deterministas e não deterministas

Existem várias formas de classificar os algoritmos de otimização. Uma das essenciais é entender a sua natureza de funcionamento, o que pode levar à divisão em duas categorias de algoritmos: os Algoritmos Deterministas e os Algoritmos Não Deterministas também designados de Algoritmos Estocásticos (Yang X. S., 2011). A classe dos algoritmos deterministas segue sempre o mesmo caminho para atingir o resultado, ou seja, desde que o ponto inicial seja o mesmo, o algoritmo segue um procedimento muito rigoroso de operações e o resultado obtido tanto das variáveis de projeto como o resultado final da função objetivo são exatamente iguais de todas as vezes que se executa o algoritmo. A classe dos algoritmos Não Deterministas ou Estocásticos seguem um caminho aleatório ou baseado em probabilidades para atingir o resultado. Nestes algoritmos existe sempre uma etapa em que há geração aleatória de valores, o que origina que o caminho percorrido pelo algoritmo seja sempre diferente, ou dificilmente será igual. Embora a solução tenda a convergir sempre para o mesmo ponto, a forma como o algoritmo atinge esse ponto nunca é a mesma. Desta forma tanto a solução final como o resultado das variáveis de projeto terão sempre valores diferenciados em cada vez que se executa o algoritmo.

### 2.2. Otimização Contínua e Otimização discreta

Quando a procura da solução é feita num conjunto infinito de pontos, ou seja, o espaço de pesquisa é infinito, o problema denomina-se de problema de otimização contínua. Normalmente, neste tipo de problemas, as variáveis de projeto são do tipo real ( $x_i \in \mathbb{R}$ ). Os problemas de otimização contínua estão relacionados com o tipo de variáveis a otimizar, quando se trata de grandezas que possam ser medidas em quantidades não inteiras, utiliza-se a formulação contínua, uma vez que o resultado pretendido pode assumir qualquer valor. Quando o espaço de procura está confinado a um conjunto de pontos, isto é, o espaço de pesquisa é finito, o problema toma o nome de problema de otimização discreta. Problemas que tratam apenas de valores inteiros ( $x_i \in \mathbb{Z}$ ) também são problemas de otimização discreta, pois considera-se o conjunto dos números inteiros como um conjunto finito.

### 2.3. Ótimo local, Global

A procura é feita de forma a encontrar a solução ótima global, o que nem sempre acontece, estando este resultado dependente das características do algoritmo utilizado e da sua habilidade de procura. Uma solução ótima global pode ser definida (Nash & Sofer, 1996), (Nocedal & Wright, 1999) como:

Para um qualquer ponto  $x \in S$  se  $f(x_1) \leq f(x)$  então  $x_1$  é um mínimo global.

Quando tal não acontece, apenas se encontra um mínimo local dentro de uma determinada vizinhança  $V_x$ . Define-se vizinhança de  $x$  (Costa, 2003) como sendo um conjunto aberto que contém  $x$  e está contida no domínio de  $f(x)$ . Duas definições podem ser aplicadas, a de mínimo local fraco e mínimo local forte.

Para um ponto  $x \in V_x$  se  $f(x_1) \leq f(x)$  então  $x_1$  é um mínimo local fraco. Por outro lado, um ponto  $x \in V_x$  se  $f(x_1) < f(x)$  e  $x_1 \neq x$  então  $x_1$  é um mínimo local forte.

## 2.4. Convexidade e Concavidade

Um conjunto  $S$  é convexo se, para quaisquer dois pontos contidos nesse conjunto,  $a, b \in S$  e  $\alpha \in [0,1]$ , se tem  $\alpha a + (1 - \alpha)b \in S$ , ou seja, quaisquer dois pontos ligados por uma reta  $r$ , essa reta ainda pertence ao conjunto  $S$ .

Uma função é considerada convexa no seu domínio se para quaisquer dois pontos  $a, b$  contidos nesse domínio,  $\alpha \in [0,1]$  se tem  $f(\alpha a + (1 - \alpha)b) \leq \alpha f(a) + (1 - \alpha)f(b)$ .

Na Figura 2-2 está representada uma função convexa, ou seja, para quaisquer dois pontos ligados por uma reta  $r$ , a função fica sempre abaixo de  $r$ . Uma função não convexa ou côncava, está representada na Figura 2-1, onde se pode observar uma porção da função acima de  $r$ . Para um problema sem restrições, em que a sua função objetivo é uma função convexa em todo o seu domínio, um ótimo local é também um ótimo global.

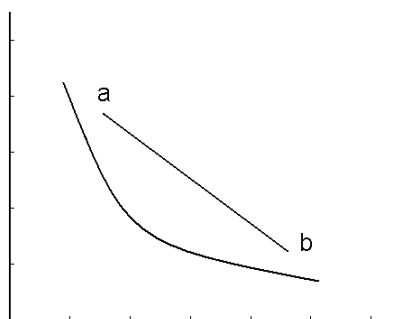


Figura 2-2- Função Convexa

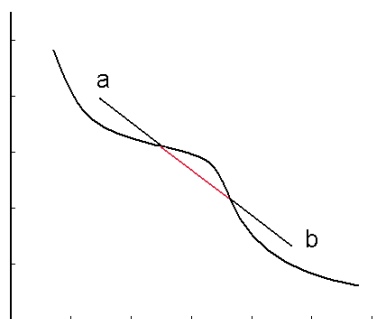


Figura 2-1- Função não convexa

## 2.5. Heurística e Meta-heurística

Quando perante um algoritmo de natureza estocástica é comum surgirem dois conceitos, heurísticas e meta-heurísticas. O conceito de heurística (Reeves, 1995) foi introduzido como uma técnica para atingir bons resultados, isto é quase ótimas soluções. De um algoritmo considerado heurístico espera-se que ele consiga chegar a uma boa solução, mas isso nem sempre é conseguido, nem se conhece bem os caminhos percorridos para chegar à solução. O termo heurístico pode ser definido como “tentar encontrar” ou “encontrar por tentativas” (Yang X. S., 2011), ou seja, a pesquisa é baseada na tentativa e erro. Pode ser também

entendido como uma boa aproximação da solução ótima, ou seja, dificilmente se conseguirá atingir a mesma solução em execuções diferentes, podendo mesmo o algoritmo direcionar a pesquisa para soluções bem diferentes da ótima. A utilização destes algoritmos não garante que se consegue encontrar uma solução ótima mas espera-se soluções perto de tal, contudo, o algoritmo não consegue demonstrar o quanto distante está da solução ótima. Normalmente estes algoritmos utilizam-se quando os dados do problema são escassos e incertos, quando não existem métodos exatos ou quando existindo requerem um elevado esforço computacional, ou quando o utilizador precisa de obter rapidamente um vasto conjunto de soluções para escolher uma delas (Barrico, 2007). O surgimento de problemas aos quais os algoritmos heurísticos não conseguiam dar resposta, originou o desenvolvimento de novas técnicas, mais versáteis, que pudessem dar resposta a um mais vasto leque de problemas. Desta forma, surgiu o conceito de meta-heurísticas (Glover, 1986). O termo “meta” significa “melhor desempenho”, ou “acima de” (Yang X. S., 2011). Os algoritmos são considerados como tendo melhor desempenho que os simplesmente heurísticos. Isto é, uma meta-heurística, utiliza heurísticas subordinadas, pois utiliza uma conjugação entre procura aleatória de soluções em regiões não testadas (“*exploration*”) com procura local ou concentração na vizinhança de soluções já conhecidas (“*exploitation*”) de forma a encontrarem uma solução ótima.

As meta-heurísticas têm intrínsecas algumas características que promovem a sua utilização (Barrico, 2007): as heurísticas são dependentes da especificidade do problema, enquanto as meta-heurísticas têm um domínio de aplicação mais amplo; as heurísticas assentam em processos iterativos que geralmente terminam quando não for encontrada uma solução que melhore a anterior, enquanto as meta-heurísticas incorporam estratégias de exploração do espaço das soluções para além da otimalidade local; as meta-heurísticas inspiram-se em processos estudados em áreas tao diversas como as ciências sociais, a física, a biologia, etc. (Yang X. S., 2011).

## 2.6. Algoritmos Evolucionários

Os Algoritmos Evolucionários (AE) são procedimentos meta-heurísticos, utilizados em sistemas computacionais, que tentam imitar alguns dos mecanismos da evolução natural baseados em processos evolutivos biológicos. Estes modelos computacionais são baseados em heurísticas as quais não permitem garantir a convergência para a melhor solução pois utilizam métodos estocásticos e iterativos.

O processo de evolução começa por gerar uma população inicial, normalmente aleatória, de possíveis soluções do problema. Segue-se a avaliação da população por uma função, designada de função de *fitness*, que avalia cada elemento da população e lhe atribui um valor de aptidão. A pesquisa de novas soluções é orientada pela qualidade do valor de aptidão atribuído às gerações antecedentes. Gerações sucessivas são originadas, sendo a seguinte geração obtida de uma antecedente que é submetida às etapas de seleção, cruzamento,

mutação e substituição. Na seleção, é criada uma subpopulação, onde os elementos com maior valor de aptidão têm maior probabilidade de serem selecionados. A esses elementos são aplicados os operadores cruzamento, para o qual são necessários dois indivíduos, e mutação que é aplicado a um só indivíduo, de forma a criar uma nova geração de indivíduos. Os novos elementos vão substituir os da população inicial fazendo com que os com pior valor de aptidão sejam removidos, permanecendo os com melhor valor de aptidão. O processo repete-se até se atingir um critério de paragem. Existem diversos algoritmos Evolucionários, de onde se destacam as Estratégias Evolucionárias (Rechenberg, 1964), (Rechenberg, 1973), Programação Evolucionária (Fogel, Owens, & Walsh, 1966) e os Algoritmos Genéticos (Holland, 1975), (Goldberg, 1989).

## 2.7.Princípio de dualidade

Tanto em problemas de otimização mono-objetivo como em multi-objetivo, cada função pode ser maximizada ou minimizada. Neste contexto o princípio da dualidade indica que se pode converter um problema de maximização em minimização e vice-versa, se a função objetivo for multiplicada por “-1” (Deb, 1995), (Rao, 1984), (Reklaitis, Ravindran, & Ragsdell, K.M., 1983). A maioria dos algoritmos são desenvolvidos para resolverem apenas uma das opções, minimizar ou maximizar funções, desta forma, quando se têm várias funções objetivo e se pretende minimizar umas e maximizar outras, pode-se utilizar o princípio da dualidade. Este critério permite transformar todas as funções em apenas uma das opções. Da mesma forma, quando se trata das funções de constrangimento de desigualdade, o mesmo critério pode ser utilizado. Alguns algoritmos apenas estão preparados para tratar desigualdades de um dos tipos ( $\geq$ ,  $\leq$ ), multiplicando as funções por “-1” os constrangimentos podem ser transformados no mesmo tipo. Desta forma, o princípio de dualidade, pode ser utilizado para transformar as funções objetivo e as funções de desigualdade, para que os algoritmos as possam utilizar sem que estas transformações alterem o resultado final.

## 2.8.Otimização Mono-objetivo

A otimização mono-objetivo tem como finalidade a procura e otimização de uma única função objetivo. O objetivo é maximizar ou minimizar o resultado, ou seja, a procura de uma solução única e global. A função objetivo pode estar sujeita a restrições, a que todas as soluções admissíveis têm de respeitar (Nocedal & Wright, 1999).

### 2.8.1.Formulação matemática Mono-objetivo

A formulação apresentada tem como finalidade encontrar o mínimo de uma função genérica:

$$\min/\max f(x) \quad x \in S, \quad (1)$$

Sujeito a:

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (2)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$x_i^{inf} \leq x_i \leq x_i^{sup}, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Onde  $f(x)$  é a função a otimizar,  $x_i$  é o vetor das variáveis decisão ou variáveis de projeto,  $g(x)$  é o vetor das restrições do tipo desigualdade e  $h(x)$  o vetor das restrições do tipo igualdade.

O problema é constituído por  $i$  variáveis de decisão, que representam as possíveis soluções do problema. Normalmente estão compreendidas num intervalo tendo como mínimo  $x_i^{inf}$  e como máximo  $x_i^{sup}$ . As  $j$  restrições de desigualdade podem ser do tipo maior ou igual " $\geq$ " ou menor ou igual " $\leq$ ". O vetor das restrições de igualdade tem dimensão  $K$ .

Se todas as  $x_i$  soluções respeitarem os seus intervalos  $x_i^{inf}$  e  $x_i^{sup}$  são denominadas de soluções admissíveis. Ao conjunto das soluções  $S$  que respeitam as  $g_j$  e  $h_k$  restrições chama-se região admissível  $Z$  :

$$Z = \{x \in S : g(x) \geq 0 \wedge h(x) = 0\} \quad (5)$$

## 2.9. Otimização Multi-Objectivo

Quando se está perante um problema em que se pretende otimizar mais que uma função, isto é, quando existe mais que um objetivo, chama-se de otimização multi-objetivo. Nestes problemas, não está associado o conceito de solução ótima, característico da otimização mono-objetivo, pois uma solução que seja ótima para um dos objetivos, normalmente não o é para os restantes. Ou seja, os ótimos de cada um dos objetivos considerados individualmente são diferentes, então diz-se que os objetivos são conflituosos. Neste tipo de problemas não é possível encontrar uma solução ótima mas sim um conjunto de soluções ótimas. No caso dos objetivos não serem conflituosos, as soluções ótimas são comuns a todos os objetivos e o problema pode ser resolvido como mono-objetivo. Desta forma, o conceito de solução ótima, característica de um problema mono-objetivo, é substituído pelo conceito de não dominância ou frente ótima de Pareto, também chamada de frente ótima ou frente de Pareto.

### 2.9.1. Formulação matemática Multi-objetivo

Matematicamente, um problema de otimização multi-objetivo implica a minimização ou maximização de um conjunto de funções sujeitas a restrições (Zitzler & Thiele, 1999), (Sawaragi, Nakayama, & Tanino, 1985) e é formulado da seguinte forma:

$$\min/\max f_m(x), \quad m = 1, \dots, M; x \in S \quad (6)$$

Sujeito a:

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (7)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$x_i^{inf} \leq x_i \leq x_i^{sup}, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

Tal como num problema mono-objetivo uma solução  $x$  é um vetor de variáveis de projeto em que  $x = (x_1, \dots, x_n)$ . O espaço das variáveis está compreendido entre o limite inferior  $x_i^{inf}$  e o limite superior  $x_i^{sup}$ . No problema existem  $M$  funções objetivo, sendo que  $M \geq 2$ . O vetor  $g_j$  é o vetor dos constrangimentos de desigualdade e tem dimensão  $J$ ,  $h_k$  é o vetor de constrangimentos de igualdade e tem dimensão  $K$ . À semelhança do espaço multi-dimensional das variáveis de decisão, num problema multi-objetivo, surge um novo espaço, o das funções objetivo  $f(x) = z = (x_1, \dots, x_n)$ . Ou seja, para cada solução  $x_i$  do espaço das variáveis de projeto, existe um ponto associado no espaço das funções objetivo. Isto é, considera-se o espaço das variáveis  $S$ , o conjunto de todos os valores possíveis para as variáveis de decisão. O conjunto das soluções  $S$  denomina-se de região admissível  $Z$  se cumprir com os constrangimentos:

$$Z = \{x \in S : g(x) \geq 0 \wedge h(x) = 0\} \quad (10)$$

A imagem de todos os valores possíveis para as variáveis de decisão que satisfazem as restrições, ou seja, o conjunto  $Z$ , constitui o espaço dos objetivos. Um ponto admissível no espaço das variáveis,  $x \in Z$ , é considerado uma solução a qual tem um ponto correspondente no espaço dos objetivos.

Na Figura 2-3 estão representados as possíveis soluções da avaliação do ponto  $x$ . O ponto  $z^*$  apesar de pertencer ao espaço das soluções, não está incluído no conjunto  $Z$  pois não cumpre com os constrangimentos. O ponto  $z$  cumpre com os constrangimentos e portanto está incluído no espaço das soluções possíveis.

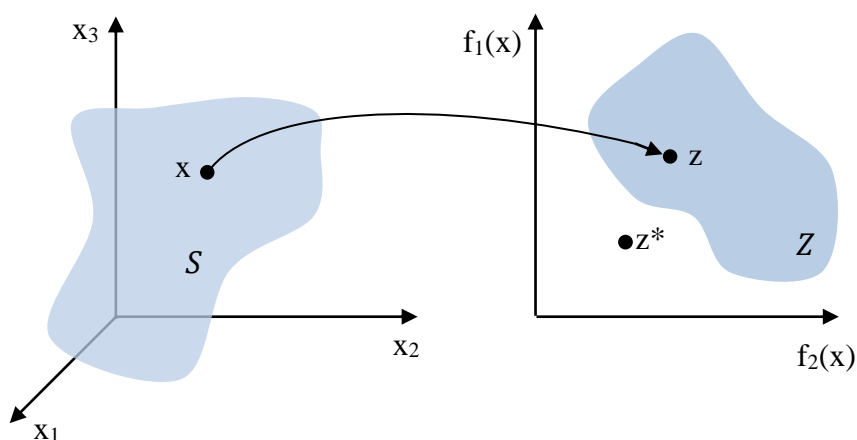


Figura 2-3- Espaço das variáveis de projeto e correspondente espaço dos objetivos

### 2.9.2. Conceito de Dominância

O conceito de dominância é utilizado pela maioria dos algoritmos multi-objetivo. Este conceito é utilizado para comparar duas soluções, e determinar a relação de dominância entre elas. Quando se compara duas soluções pode-se concluir que uma solução  $x_1$  domina uma solução  $x_2$  se as duas condições seguintes forem verdadeiras (Deb, 2001):

- a) A solução  $x_1$  não é pior que a solução  $x_2$ , ou  $f_j(x_1)$  não é pior que  $f_j(x_2)$ , em todas as  $j = 1, \dots, M$  funções objetivo.
- b) A solução  $x_1$  é estritamente melhor que a solução  $x_2$  em pelo menos uma função objetivo, ou  $f_j(x_1)$  é estritamente melhor que  $f_j(x_2)$  para pelo menos um  $j \in \{1, \dots, M\}$ .

A definição anterior é denominada de dominância fraca. Um conceito de dominância forte, implica que uma solução domine estritamente a outra solução. Desta forma surge a seguinte definição (Deb, 2001): A solução  $x_1$  domina fortemente a solução  $x_2$  se a solução  $x_1$  for estritamente melhor que a solução  $x_2$  em todas as  $M$  funções objetivo.

Quando se afirma que a solução  $x_1$  domina a solução  $x_2$ , conclui-se que a solução  $x_1$  é melhor que a solução  $x_2$ . Da análise entre duas soluções  $x_1$  e  $x_2$ , existem três conclusões a que se pode chegar:

- a) A solução  $x_1$  domina a solução  $x_2$ ;
- b) A solução  $x_1$  é dominada pela solução  $x_2$ ;
- c) Nenhuma das soluções domina a outra;

Considerando o conceito de dominância, outras propriedades podem ser apresentadas (Cormen, Leiserson, & Rivest, 1990), (Deb, 2001).

- Uma solução  $p$  não se pode dominar a si própria;
- Se uma solução  $p$  domina uma solução  $q$  então  $q$  não pode dominar  $p$ ;
- Se uma solução  $p$  domina uma solução  $r$  e  $r$  domina  $q$ , então  $p$  domina  $q$ ;
- Se a solução  $p$  não domina a solução  $q$ , não implica que  $p$  é dominada por  $q$ ;

Desta forma, é possível analisar os pontos representados na Figura 2-4, em relação à dominância. Considera-se que a Figura 2-4, apresenta os pontos conseguidos por duas funções objetivo  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$  que se pretendem minimizar.

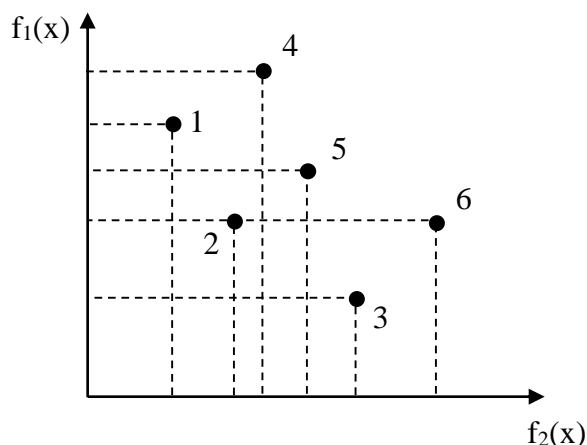


Figura 2-4 - Representação das soluções no espaço das soluções

A análise é feita comparando dois pontos de cada vez. Por exemplo, analisando os pontos 2 e 5 pode-se concluir que o ponto 2 domina fortemente o ponto 5 pois cumpre é estritamente melhor nas duas funções objetivo. Da mesma forma, o ponto 2 domina o ponto 6, pois apresenta melhor resultado para a função  $f_2(x)$  e não apresenta pior resultado para a função  $f_1(x)$ , na realidade os pontos apresentam o mesmo resultado para esta função, no entanto, a dominância é dita fraca pois apenas é estritamente melhor em uma das funções. Fazendo agora a mesma análise entre os pontos 1 e 2 pode-se afirmar que nenhum dos pontos domina o outro pois nenhum consegue cumprir com as duas condições em simultâneo. O ponto 1 domina o ponto 2 na função  $f_2(x)$  mas o ponto 1 é dominado pelo ponto 2 na função  $f_1(x)$ . Desta forma não se pode concluir qual dos pontos é melhor se as duas funções objetivo tiverem o mesmo peso ou a mesma importância.

### 2.9.3.Frente não Dominada

Num conjunto de soluções estas podem ser comparadas entre si até que se encontre um determinado grupo de soluções que não são dominadas por nenhuma outra solução. Este conjunto de soluções não dominadas tem o nome de “frente não dominada”. A frente não dominada é definida como (Deb, 2001): Entre um conjunto de soluções  $P$ , pertence ao conjunto de soluções não dominadas  $P'$  todas as soluções que não sejam dominadas por nenhuma solução do conjunto  $P$ . Quando  $P$  representa todo o espaço de procura então a frente não dominada  $P'$  tem o nome de Frente ótima de Pareto. Nesta técnica todas as soluções dominadas são tratadas como iguais, surgindo duas frentes, a frente dominada e a não dominada. A escolha da solução para um problema multi-objetivo deve ser escolhida da frente não dominada, pois é aqui que estão as melhores soluções. Em duas soluções da frente não dominada a melhoria de uma implica sempre o sacrifício da outra. Desta forma, e como foi referido atrás, se todas as funções objetivo tiverem o mesmo peso na seleção, não se pode escolher um ponto ideal. Cabe ao utilizador seleccionar o ponto da frente não dominada que melhor satisfaça as suas necessidades.

A Figura 2-5 representa a frente ótima de Pareto para um conjunto de soluções quando se pretende minimizar as duas funções  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$ . Na linha a preto estão todas soluções que não são dominadas por nenhuma outra solução. Na Figura 2-5 estão representadas as soluções quando se pretende minimizar ambas as funções, mas outras três possíveis situações poderiam surgir: minimizar  $f_1(x)$  e maximizar  $f_2(x)$ ; minimizar  $f_2(x)$  e maximizar  $f_1(x)$ ; ou maximizar ambas as funções  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$ .

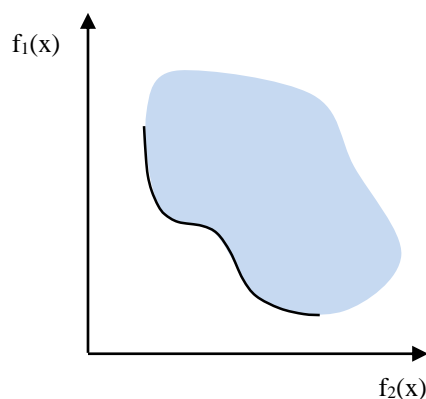


Figura 2-5- Representação das soluções no espaço das soluções

Como alguns algoritmos não estão preparados para lidar com essas situações e maioria deles apenas lida com problemas de minimização das funções objetivo, recorre-se ao princípio de dualidade. O princípio de dualidade permite transformar qualquer das situações possíveis em problemas de minimização.

Como se se definiu atrás dominância fraca e dominância forte, surge também a par da frente não dominada a frente fraca não dominada (Deb, 2001), que é definida da seguinte forma: Entre um conjunto de soluções  $P$ , ao conjunto das soluções da frente fraca não dominada  $P'$  pertencem todas as soluções que não são fortemente dominadas por nenhuma solução de  $P$ . Fazendo ainda referência à Figura 2-4, a frente ótima de Pareto seria formada pelos pontos 1, 2 e 3, o que na realidade não é a frente ótima real pois tem contemplado o ponto 2 que apenas é um dominante fraco sobre o ponto 6 e seria a frente ótima de Pareto aparente. Desta forma, a frente ótima de Pareto, nem sempre apresenta todas as melhores soluções para o problema.

#### 2.9.4. Níveis de Dominância

Existe uma classe de algoritmos que não faz apenas a diferenciação entre frente dominada e não dominada. Estes classificam a população por níveis de dominância, sendo o nível mais baixo  $N_1$  a frente ótima de Pareto. O número de níveis vai aumentando até ao último nível onde se encontram as piores soluções. Qualquer nível  $N_i$  é dominado pelo nível  $N_{i-1}$  e domina o nível  $N_{i+1}$  para qualquer  $i = 2, \dots, N$ .

A principal diferença para determinar as várias frentes não dominadas de uma população está na complexidade de cada algoritmo, na forma que armazena os dados, e na velocidade de

execução. Existem principalmente dois métodos para determinar as várias frentes associadas aos níveis de dominância (Barrico, 2007), o primeiro consiste em determinar primeiro a frente de Nível 1, composta pelas soluções não dominadas, e depois as restantes frentes para os restantes níveis. Para cada contagem de cada nível, a comparação é feita em termos de dominância pelas restantes soluções dominadas, ignorando todas as soluções não dominadas. Um outro processo consiste em determinar inicialmente, para cada solução, um contador, com o número de soluções que dominam a solução e um conjunto com as soluções que são dominadas pela mesma solução. Ao fim de cada contagem as soluções com o contador a zero pertencem ao nível mais baixo. Aos conjuntos de cada solução da frente não dominada, é retirado um valor ao contador, as soluções que ficarem com o contador a zero tornam a frente não dominada dessa contagem. O processo repete-se até todas as soluções estarem distribuídas por níveis. Na Figura 2-6 está representado um exemplo de níveis de dominância. O nível 1 e o nível 2 apresentam 3 soluções cada não dominadas e o nível 3 apenas apresenta uma solução.

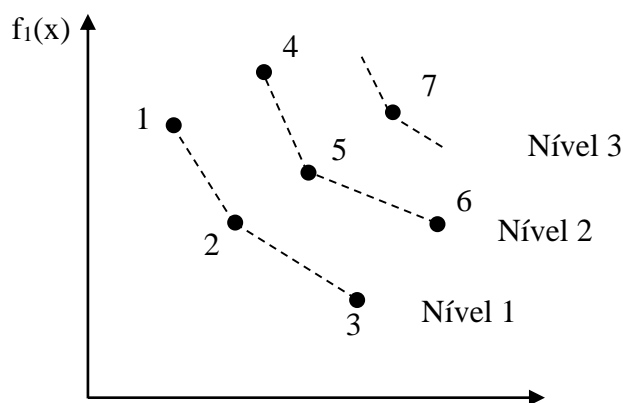


Figura 2-6- Níveis das frentes de Pareto.

### 2.9.5.Frente local e Frente Global

Tal como em otimização mono-objetivo a solução encontrada pode ser local ou global, também em otimização multi-objetivo a frente ótima de Pareto encontrada pode ser local ou global. A frente ótima global pode ser definida como (Deb, 2001): A frente não dominada de todo o espaço de busca é a frente não dominada global. Como todas as soluções neste conjunto são não dominadas quando comparadas com todas as soluções encontradas, então este conjunto de soluções é a frente ótima de Pareto. No entanto podem acontecer cenários em que a frente é apenas um ótimo local. A frente ótima local é definida como (Deb, 1999), (Miettinen, 1999): se para cada solução  $x$  de um conjunto  $P''$  não existe nenhuma solução  $y$ , (na vizinhança de  $x$ , tal que  $\|y - x\|_{\infty} \leq \varepsilon$ , em que  $\varepsilon$  é um número positivo muito pequeno), que domine qualquer solução de  $P''$ , então as soluções que pertencem ao conjunto  $P''$  constituem um conjunto ótimo de Pareto local. Na Figura 2-7 estão representadas duas frentes ótimas de Pareto, a frente ótima local, representada com a linha a cheio, e a frente ótima global representada com a linha a tracejado. Analisando o Ponto A especificamente, se este ponto sofrer uma pequena oscilação no espaço das variáveis de decisão, a solução ótima cairá

sobre a frente local ótima assinalada e não na frente ótima global. Pela definição de frente ótima local conclui-se que a frente ótima global é também uma frente ótima local.

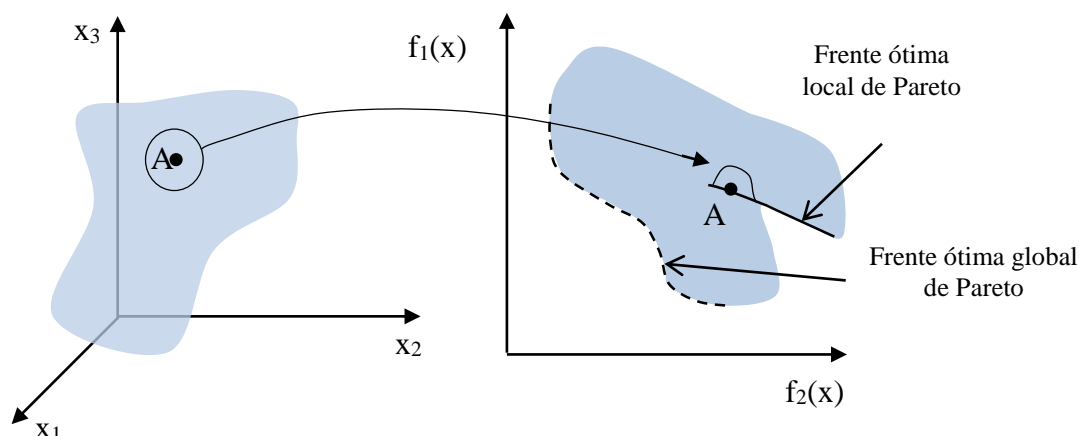


Figura 2-7 - Frente ótima de Pareto local e global

## 2.10. Métodos para lidar com constrangimentos

Nos problemas reais, principalmente nos de engenharia, dificilmente se encontram problemas que não estejam sujeitos a constrangimentos. A aplicação dos constrangimentos divide o espaço das soluções em dois, o espaço das soluções possíveis e o espaço das soluções não possíveis. Os constrangimentos podem ser de dois tipos: os constrangimentos de igualdade e os constrangimentos de desigualdade. Uma classificação possível (Deb, 1995) pode ser aplicada para diferenciar os constrangimentos em fortes, que são os constrangimentos de igualdade, e fracos, os de desigualdade. Os fortes são bastante difíceis de satisfazer principalmente se forem não lineares no espaço das variáveis de decisão. Desta forma, todos os constrangimentos fortes, os de igualdade, podem ser convertidos em constrangimentos de desigualdade sem que se verifique perda de originalidade (Deb, 1995). Na formulação seguinte são considerados apenas os constrangimentos de maior ou igual, no entanto, se existirem desigualdades do tipo menor ou igual estes podem ser convertidos utilizando o critério de dualidade. Assim sendo, se para uma solução  $x_i$  todas as soluções  $g_j(x_i) \geq 0$ ,  $j = 1, \dots, J$ , a solução é possível e não existem violações dos constrangimentos. Se algum dos constrangimentos  $g_j(x_i) < 0$  então a solução é não possível e existe uma violação no constrangimento  $j$ . A soma total das violações é dada por  $|g_j(x_i)|$ . Quando o algoritmo não cumpre todos os constrangimentos, este tem de fazer a seleção das soluções possíveis e as não possíveis. De seguida são apresentadas algumas das formas mais comuns descritas na literatura de como lidar com constrangimentos.

### 2.10.1. Ignorar soluções não possíveis

Um das formas mais fáceis e mais comuns de lidar com os constrangimentos é simplesmente ignorar as soluções que violam os constrangimentos (Coello & Christiansen, 1999). No entanto, nos problemas reais, existe bastante dificuldade em encontrar uma solução que respeite todos os constrangimentos se tratar de um problema mono-objetivo, e mais difícil é ainda se tiver de encontrar a frente ótima de Pareto para um problema multi-objetivo. O algoritmo, quando se depara com uma solução não possível, calcula da mesma forma o resultado da função objetivo para essa solução, de forma a poder comparar todas as soluções não possíveis entre si e também com as soluções possíveis (Deb, 2001). Um critério utilizado é a medida da violação do constrangimento (Deb, 2000), (Michalewicz & Janikow, 1991). Desta forma, o algoritmo pode fazer maior pesquisa nas soluções com menor medida de violação de constrangimento de forma direcionar a busca em direção ao espaço das soluções possíveis.

### 2.10.2. Função Penalti

Este método é bastante utilizado para lidar com constrangimentos. Tal como no caso anterior, o princípio de dualidade pode ser utilizado para manipular tanto funções objetivo como constrangimentos. Para esta formulação vai-se assumir que todas as funções objetivo são minimizadas e todos os constrangimentos são normalizados para a forma maior ou igual  $g_j(x_i) \geq 0$ ,  $j = 1, \dots, J$ . Para cada solução  $x_i$  a violação de cada constrangimento é calculada da seguinte forma (Deb, 2001):

$$\omega_j(x_i) = \begin{cases} |g_j(x_i)|, & \text{se } g_j(x_i) < 0 \\ 0, & \text{se } g_j(x_i) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

De seguida é feita a soma de todas as violações dos constrangimentos:

$$\Omega(x_i) = \sum_{j=1}^J \omega_j(x_i) \quad (12)$$

A soma dos constrangimentos é depois multiplicada por um fator  $R_m$  e o produto é somado a cada uma das funções objetivo.

$$F_m(x_i) = f_m(x_i) + R_m \cdot \Omega(x_i) \quad (13)$$

Para soluções possíveis a soma das violações  $\Omega$  é zero e as funções  $F_m$  são iguais às funções  $f_m$ . Para as soluções não possíveis  $F_m > f_m$ . O parâmetro  $R_m$  é utilizado para que os dois elementos do lado direito da equação acima tenham a mesma magnitude. O parâmetro  $R_m$  pode ser dinâmico para que melhor se adapte, às funções objetivo. Num problema multi-objetivo as diferentes funções objetivo podem ter magnitudes diferentes e neste caso é conveniente que o parâmetro se adapte às funções.

### 2.10.3. Torneio Binário

O torneio binário é entendido como a comparação entre dois indivíduos do espaço das soluções. Como descrito por Deb (Deb, 2001), os autores (Jiménez, F., Verdegay, J.L., & Coméz-Skarmeta, 1999) sugeriram um método de torneio binário para algoritmos de otimização multi-objetivo onde utilizam a técnica de pesquisa de nicho de forma a manter a diversidade na frente ótima de Pareto. Em mono-objetivo outros autores (Deb, 2000), utilizaram o mesmo tipo de torneio binário. Quando se está perante a um torneio entre dois indivíduos três soluções podem surgir, as duas soluções são possíveis, as duas soluções são impossíveis ou uma é possível e a outra é não possível.

No primeiro caso onde as duas soluções são possíveis, não existe a necessidade de preocupação com soluções não possíveis. Desta forma, seleciona-se um grupo aleatório de soluções, e deste grupo escolhem-se duas, e faz-se a comparação. Se uma das soluções não for dominada por nenhuma outra solução e se todas as outras soluções forem dominadas por pelo menos uma solução, a solução que não for dominada é a vencedora do torneio. Se ambas as soluções comparadas forem dominadas ou não dominadas, significa que são ambas boas ou ambas más em termos de dominância. Neste caso faz-se uma análise à vizinhança de cada solução e uma contagem de nicho é efetuada. Uma contagem baixa significa que a solução se encontra numa zona menos povoada e é escolhida como a vencedora do torneio.

No caso em que ambas as soluções são não possíveis, o processo é semelhante ao anterior, mas o grupo aleatório, é selecionado de entre as soluções não possíveis. Uma forma de comparar as soluções é por exemplo, o tamanho da violação que cada uma efetua. Quanto menor a violação, menor é a distância ao espaço das soluções possíveis, e assim a solução com estas características ganha o torneio. No caso de empate efetua-se o mesmo procedimento de contagem de nicho como no caso anterior e ganha a solução que tiver menor contagem.

No terceiro caso em que uma das soluções é possível e a outra não, a escolha é óbvia, e ganha a solução que se encontra dentro do espaço das soluções possíveis.

## 2.11. Algoritmos Inspirados na Natureza

Um dos primeiros conceitos com inspiração na natureza foram as redes neuronais (RN). Estes sistemas têm como fundamento as redes de neurónios existentes no cérebro. Em 1943 foi apresentada uma analogia entre células nervosas e um processo eletrónico (Pitts & McCulloch, 1943), simulando o comportamento de um neurónio, no qual este apresentava um resultado em função de uma ou várias entradas. O conceito de rede neuronal foi apresentado mais tarde (Turing, 1948) num relatório sobre máquinas inteligentes. Duas décadas depois Lawrence J. Fogel tentou utilizar o conceito de evolução como processo de aprendizagem em inteligência artificial na sua tese de doutoramento (Fogel J. , 1964). Na mesma altura surgiram também as Estratégias Evolucionárias (EE) (Rechenberg, 1964) caracterizadas por

considerarem apenas um operador na geração de novas soluções. Mais tarde (Fogel, Owens, & Walsh, 1966) desenvolveram a Programação Evolucionária (PE) que utiliza mais que um operador. Charles Darwin descreveu na sua teoria da evolução que o homem era resultado de um processo evolutivo de adaptação, “the survival of the fittest”, ou seja, perdura aquele que melhor se adaptar às condições a que está exposto. Esta teoria foi utilizada como inspiração para um dos modelos computacionais mais conhecidos e mais utilizado em otimização. A teoria do modelo evolucionário inspirado na genética foi apresentada por John Holland (Holland, 1975). A teoria dos algoritmos genéticos foi desenvolvida durante a década 70, e um aluno de Holland, obteve as primeiras aplicações com sucesso industrial (Goldberg, 1989). Desde então, os algoritmos genéticos, têm sido aplicados com sucesso, em diversos problemas de otimização, nas mais diversas áreas, sendo atualmente, o algoritmo mais utilizado e mais citado em otimização. O comportamento dos animais na sua luta diária de sobrevivência e procura de alimento tem sido bastante utilizado na inspiração para sistemas computacionais. Em 1992 foi apresentado um algoritmo inspirado no comportamento das formigas (Dorigo, 1992). O algoritmo “Ant Colony Optimization” (ACO) baseado num comportamento de inteligência de enxame, onde as formigas utilizam feromonas e outros químicos para comunicarem entre si. O rasto de feromonas deixado pelas formigas, quando encontram comida, é seguido por outras, sendo o rasto tanto mais intenso quanto maior for a quantidade, ou qualidade de comida encontrada. O algoritmo “Particle Swarm Optimization” (PSO), surgiu poucos anos depois (Kennedy & Eberhart, 1995), e tem sido muito utilizado pela comunidade científica pela sua versatilidade e bons resultados apresentados. O PSO tem inspiração no comportamento social de bandos de pássaros ou nos cardumes de peixes, ou seja, a analogia é apresentada como um conjunto de partículas que se movem no espaço de procura. Este algoritmo é apresentado como sendo um dos, ou mesmo o algoritmo com melhor desempenho existente. A abelha é outro animal que pelas suas capacidades de sobrevivência e pelos seus hábitos sociais serviu de inspiração para alguns algoritmos de otimização. Em 2004 (Nakrani & Tovey, 2004) foi proposto o algoritmo “Honey Bee Algorithm” (HBA), em 2005 (Pham, Ghanbarzadeh, Koc, Otri, Rahim, & Zaidi, 2005) propuseram o algoritmo “Bee Algorithm” (BA) e (Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, 2005) apresentou o algoritmo “Artificial Bee Colony”. Estes últimos apesar de terem diferentes formulações, são todos baseados no comportamento das abelhas. Outros animais serviram de inspiração a outros autores. Vários são os algoritmos e sistemas computacionais que imitam os comportamentos sociais, de sobrevivência ou adaptação de animais. O comportamento social dos pirilampos das florestas tropicais, na forma como utilizam a intensidade do piscar, serviu de inspiração para o algoritmo “Firefly Algorithm” (FA) (Yang X. , 2008). Mais tarde o mesmo autor (Yang & Deb, 2009) desenvolveu o algoritmo “Cuckoo Search” (CS) inspirado na procura feita pelo pássaro cuco em conjunto com a técnica de deslocamentos aleatórios “Levy flight” (LF). Ainda o mesmo autor (Yang X. , 2010) apresentou um algoritmo inspirado na ecolocalização utilizada pelos morcegos. Contando a natureza com alguns milhões de anos de evolução é normal que se tentem imitar os instintos de sobrevivência e evolução noutros sistemas.

### 3. ALGORITMOS MONO-OBJETIVO INSPIRADOS NA NATUREZA

Os algoritmos inspirados na natureza há muito que são utilizados na otimização de processos tecnológicos. A inspiração na natureza para o desenvolvimento destes algoritmos é facilmente revista em processos quotidianos e tecnológicos. A procura mais eficiente de uma solução é efetuada diariamente na natureza pelo mais simples do organismo, seja essa busca, a necessidade diária de satisfação alimentar ou mesmo da sobrevivência da espécie. De seguida são apresentados quatro algoritmos de inspiração na natureza que serão mais adiante aplicados na otimização da injeção de polímeros sobre tecido pré impregnado.

#### 3.1. Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (Holland, 1975), são uma técnica de procura estocástica, baseada na aleatoriedade, usada na otimização de problemas com funções objetivos multimodais, onde uma população de cromossomas é atualizada usando os princípios de seleção natural descritos por Charles Darwin. O algoritmo usa uma população de indivíduos criados aleatoriamente, que representam possíveis soluções para o problema, aos quais são aplicados os mecanismos (operadores) seleção e substituição para escolher os reprodutores da geração seguinte, baseados no mérito obtido pela função objetivo. Um dos métodos mais utilizados na seleção é o da Roleta Ponderada (Jenkins, 1991) onde cada individuo é representado proporcionalmente ao valor obtido pela função objetivo.

O operador genético cruzamento, que combina genes de dois indivíduos (cromossomas), para formar um novo individuo, e o operador genético mutação, usada numa proporção muito reduzida, que modifica genes individuais num único individuo para formar um novo, são os responsáveis por alargar o espaço de busca do algoritmo criando diversidade genética (Goldberg, 1989).

A Figura 3-1 representa o fluxograma de um Algoritmo Genético genérico. Este começa com a Geração de uma população aleatória, seguida dos operadores Seleção, Reprodução, Cruzamento e Mutação até que se atinja um critério de paragem.

A criação de gerações sucessivas dos indivíduos mais aptos da população, é guiada apenas pelo resultado de uma função de *fitness*, que é normalmente a função objetivo do problema a otimizar. Indivíduos com melhor resultado da função de *fitness* têm mais probabilidade de serem selecionados para reprodução, garantindo desta forma, que a sua informação genética perdure durante as gerações seguintes. Os indivíduos com maus resultados na função de *fitness* tendem a ser eliminados das populações futuras pois a sua informação genética tende a desaparecer. Novas gerações de indivíduos aptos são geradas e avaliadas sequencialmente até que um critério de paragem seja cumprido.

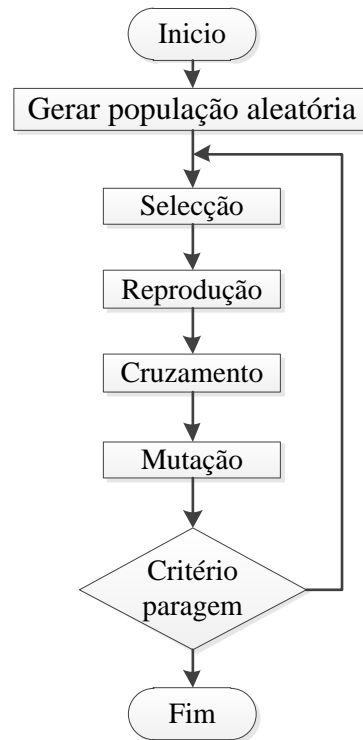


Figura 3-1 – Fluxograma Algoritmo Genético

### 3.2. Algoritmo Colonia Artificial de Abelhas

O algoritmo *Artificial Bee Colony* (ABC) (Basturk & Karaboga, 2006)   um algoritmo baseado no movimento de grupo, ou enxame, com formula o meta-heurística (Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, 2005). Ele tenta imitar o comportamento das abelhas, nas suas atividades diárias de explora o do terreno próximo   colmeia, para tentar encontrar novas fontes de alimento. Estas posi es de alimento representam a popula o de pesquisa do algoritmo e são de gera o aleatória, o que caracteriza o algoritmo no grupo dos estocásticos. As popula es geradas são possíveis solu es do problema. A qualidade de cada posi o representa a quantidade de néctar existente nessa posi o o que determina se a soluço   ou não abandonada, e   obtida através da avalia o da fun o objetivo. Existem três tipos diferentes de abelhas na col nia artificial de abelhas (Karaboga & Akay, 2009), as abelhas que trabalham na recolha de alimento (*employed bees*), as abelhas que estão   espera na col nia para decidirem sobre qual fonte de alimento escolher (*onlooker bees*) e as abelhas que fazem a procura de novas fontes de alimento (*scout bees*). Estes três tipos de abelhas elaboram as tarefas diárias necessárias   colmeia, até que o número de itera es seja atingido.

O algoritmo ABC   iniciado pelos *scouts* que procuram o primeiro grupo de solu es de forma aleatória. Cada soluço   depois transformada pela seguinte equa o (Karaboga & Akay, 2009):

$$x_{ij} = x_{min}^j + rand(0,1) \cdot (x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (14)$$

Onde  $x_{min}^j$  e  $x_{max}^j$  são os limites inferiores e superiores do elemento  $j$  da solução  $i$ .

A procura de uma nova fonte de alimento que ocorre em cada iteração é feita pela equação seguinte, onde a *employed bee* procura a área circundante à posição na sua memória:

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij} \cdot (x_{ij} - x_{kj}) \quad (15)$$

Onde  $\varphi_{ij}$  é um número aleatório compreendido  $[-1,1]$ ,  $v_{ij}$  é uma posição possível de alimento e  $x_i$  é a posição na memória da abelha.  $k \in \{1,2, \dots, SN\}$ , que tem de ser diferente de  $i$ , e  $j \in \{1,2, \dots, D\}$  que são índices aleatórios.  $D$  é a dimensão do problema e  $SN$  é o número de fontes de alimento que é igual ao número de *employed* e *onlooker bees*.

A seleção da fonte de alimento é feita por um processo ao qual o autor chamou “*greedy selection*”, ou seja uma seleção ambiciosa, a qual selecionará a fonte com maior quantidade de néctar. A informação sobre a quantidade de néctar de cada fonte é transmitida por uma dança feita pelas *employed bee* às *onlooker bees* que decidem baseadas em probabilidade a melhor fonte, e onde a probabilidade  $p_i$  é dependente da quantidade de néctar da fonte  $i$  e é calculada por:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (16)$$

Onde  $fit_i$ , é o valor de fitness para a solução  $i$  que é proporcional à quantidade de néctar dessa fonte. Tanto as *onlooker bees* como as *employed bees*, produzem uma modificação na posição, que têm em memória, avaliam a nova posição e escolhem a posição com melhor valor de *fitness*, ou seja, com maior quantidade de néctar.

A versão do algoritmo que cumpre com constrangimentos (Karaboga & Basturk, 2007) direciona a busca para zonas possíveis aplicando o método de Deb (Deb & Goldberg, 1995) em vez da *greedy selection*, onde duas soluções são comparadas utilizando um método de torneio para seleção respeitando três regras heurísticas:

- Uma solução possível é melhor que uma solução não possível.
- Entre duas soluções possíveis é selecionada a solução com melhor resultado da função objetivo.
- Entre duas soluções não possíveis é selecionada a solução com menor valor de penalidade, ou seja, mais próxima da zona possível.

Neste caso para produzir uma nova posição de alimento a partir da posição na sua memória a abelha recorre à equação seguinte:

$$v_j = \begin{cases} x_{ij} + \varphi_{ij} \cdot (x_{ij} - x_{kj}), & \text{se } R_j < MR \\ x_{ij} & \end{cases} \quad (17)$$

Onde  $R_j$  é um número gerado aleatoriamente e compreendido no intervalo  $[0, 1]$  e  $MR$  é um parâmetro que controla se  $x_{ij}$  é modificado ou não.

O período de produção de batedores (SPP) foi introduzido no algoritmo para controlar a produção de novos indivíduos para a população. Em cada iteração se alguma das fontes de alimento for abandonada, o processo de produção de um batedor é iniciado. Na Figura 3-2 está representado o fluxograma do algoritmo ABC.

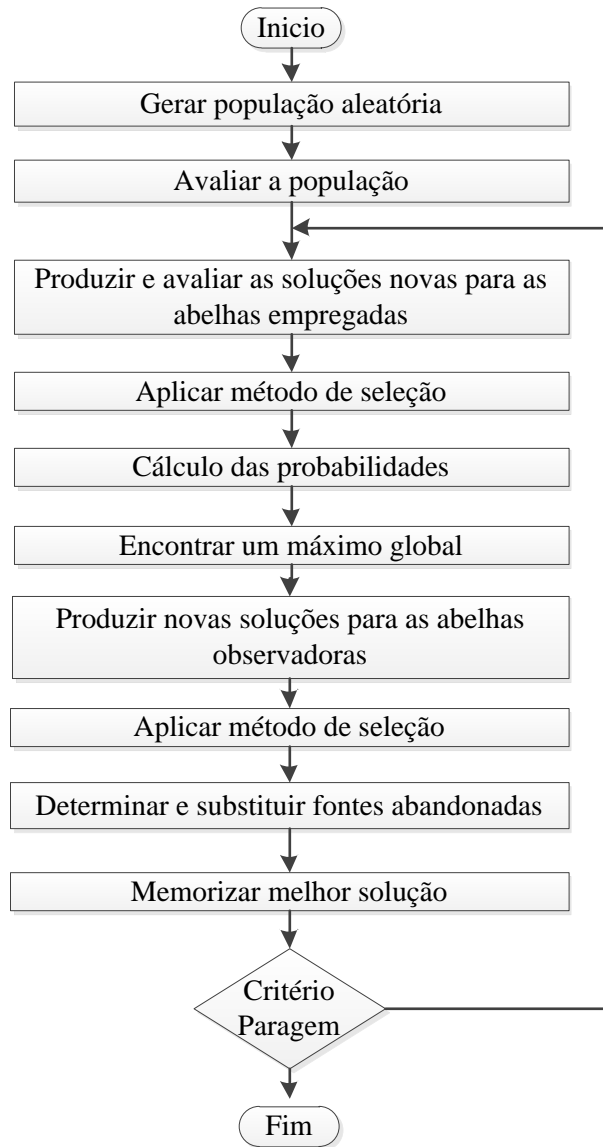


Figura 3-2 – Fluxograma do Algoritmo Colônia Artificial de Abelhas

### 3.3. Firefly Algorithm

O *Firefly Algorithm* (FA) (Yang X. S., 2008) é um algoritmo meta-heurístico de otimização com formulação estocástica, baseado no comportamento social dos pirilampos das florestas tropicais. Neste algoritmo os pirilampos vagueiam pela floresta, ou seja, as possíveis soluções do problema são dispersas pelo hiperespaço das variáveis de forma aleatória. Cada pirilampo imite um piscar, que é tanto mais brilhante quanto melhor for o resultado obtido pela função

objetivo, o que leva os restantes pirilampos a deslocarem-se na sua direção. Desta forma, vão-se deslocando em pequenos paços, cobrindo todo o espaço das variáveis. Se pelo caminho algum pirilampo piscar com mais intensidade, ou seja a função objetivo encontrar uma melhor solução, então os restantes pirilampos mudam de direção e dirigem-se para o novo mais brilhante. O algoritmo termina quando atinge um critério de paragem. Os pirilampos são atraídos pelo piscar uns dos outros, portanto toma-se como certo que entre dois pirilampos, o menos brilhante vai-se deslocar em direção ao mais brilhante de acordo com três regras (Yang X., 2009):

- Todos os pirilampos são do mesmo sexo para que esse fator não influencie na atração.
- A intensidade do brilho de cada pirilampo é baseada no resultado da função objetivo.
- A atração é proporcional ao brilho e ambos diminuem com o aumento da distância entre dois pirilampos. Se nenhum dos dois é mais brilhante que o outro ambos se movem aleatoriamente no espaço de procura.

Na Figura 3-3 está representado o Algoritmo dos pirilampos (Yang, X. S., 2011).

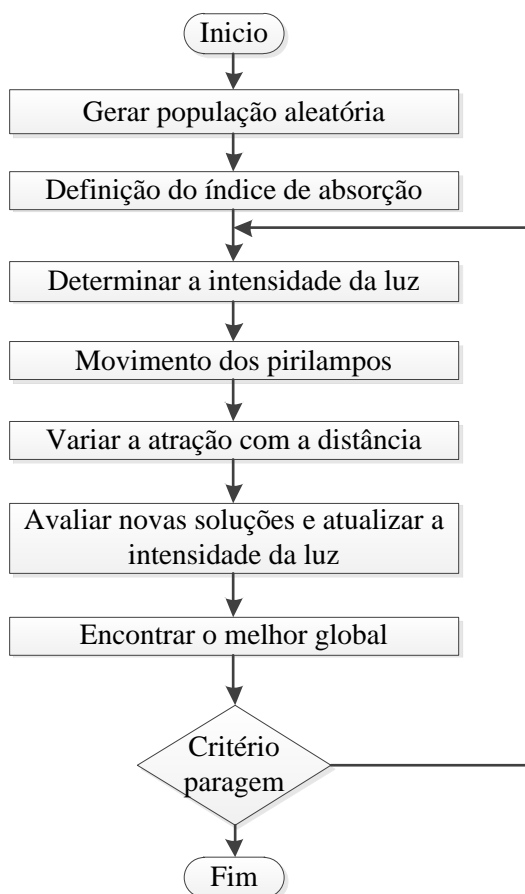


Figura 3-3 – Fluxograma do Algoritmo dos Pirilampos

Cada pirilampo é caracterizado pela intensidade da sua luz  $I(r)$  que tem uma variação monótona e exponencial com a variação de  $r$  e é obtida pela equação seguinte:

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (18)$$

Onde  $\gamma$  é o índice de absorção do meio ambiente,  $r$  é a distância entre dois pirilampos e  $I_0$  a intensidade original de cada pirilampo. A intensidade da luz de cada pirilampo é obtida pelo resultado da função objetivo que vai influenciar a atração. No entanto a intensidade do brilho diminui com a distância pois a luz é absorvida pelo meio que os rodeia.

A atração  $\beta(r)$  é proporcional a  $I(r)$  e é dada por:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (19)$$

Onde  $\beta_0$  é a atração em  $r = 0$ .

O movimento de cada pirilampo em direção a outro mais brilhante é conseguido por:

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \cdot \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (20)$$

Onde o primeiro termo é a posição original do pirilampo  $i$ , o segundo termo considera a atração e o terceiro termo introduz alguma aleatoriedade no movimento.

### 3.4. Particle Swarm Algorithm

O *Particle swarm optimization* (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995), é um algoritmo de otimização meta-heurístico de formulação estocástica inspirado na atividade de grupos de animais, principalmente nos bandos dos pássaros e nos cardumes dos peixes. Neste algoritmo um enxame de partículas move-se pelo espaço de procura, onde cada posição representa uma possível solução do problema. Cada indivíduo do grupo desloca-se entre posições a uma determinada velocidade. Tanto o movimento entre posições, como a velocidade a que se desloca cada partícula, são dependentes da última localização conhecida de cada uma e da localização da melhor partícula. Desta forma todas as partículas, vão-se deslocar em direção à melhor solução. O algoritmo termina quando é atingido um critério de paragem.

A população é inicializada atribuindo uma localização aleatória no espaço de procura, e uma velocidade que é compreendida entre os limites definidos pelo utilizador. Cada partícula  $i$  é caracterizado por  $x_{i,t}$  e  $v_{i,t}$  que representam os vetores de posição e velocidades respetivamente,  $p_{i,t}$  é a melhor posição atingida pela partícula e  $g_{i,t}$  é a melhor posição global entre todas as partículas obtida definindo uma topologia entre todos os membros do enxame, em cada instante de tempo  $t$ .

O cálculo de cada nova posição é encontrada somando à posição anterior a nova velocidade e calculada com:

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1} \quad (21)$$

E onde a velocidade é calculado por:

$$v_{i,t+1} = \alpha_{ine}v_{i,t} + \beta_1rand(0,1)(p_{i,t} - x_{i,t}) + \beta_2rand(0,1)(g_{i,t} - x_{i,t}) \quad (22)$$

Onde  $\alpha_{ine}$  é a inércia que controla a velocidade anterior, os parâmetros  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são números reais compreendidos entre [0,1] e determinam a significância de  $p_{i,t}$  e  $g_{i,t}$  respectivamente. A velocidade máxima é delimitada pelo parâmetro  $v_{max}$ . A Figura 3-4 representa o algoritmo enxame de partículas.

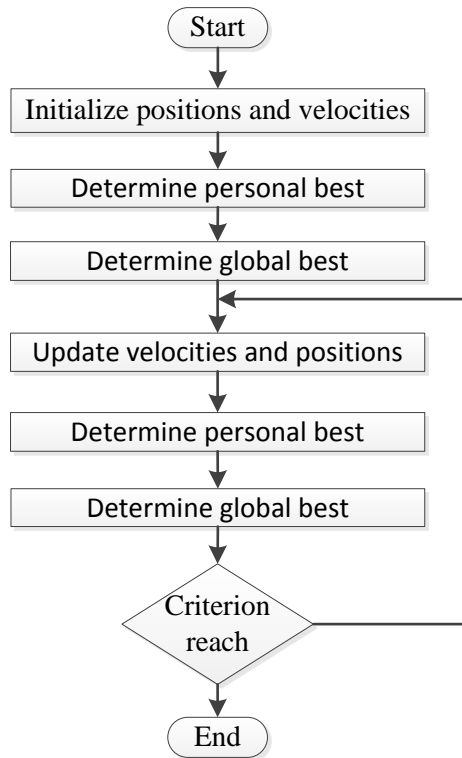


Figura 3-4 – Fluxograma do Algoritmo de Enxame de Partículas

### 3.5. Parâmetros de controlo dos algoritmos

É sabido que os parâmetros que controlam os algoritmos têm uma grande influência nos resultados obtidos. A afinação pode ser efetuada não só ao nível dos parâmetros básicos como o tamanho da população ou o número de iterações efetuadas, mas também nos parâmetros específicos de cada um dos algoritmos. Cada algoritmo tem parâmetros de controlo específicos que orientam o algoritmo no espaço de procura e manipulam os métodos de pesquisa e seleção. Abaixo é feita a descrição dos parâmetros de cada um dos algoritmos e os valores utilizados. Os valores que foram utilizados foram retirados da literatura, principalmente de artigos publicados pelos autores de cada um dos algoritmos, e são entendidos como os parâmetros comuns.

### 3.5.1. Algoritmo Genético

Na versão básica do Algoritmo Genético o parâmetro  $n$  representa a dimensão da população e  $D$  é o número máximo de gerações. O operador Cruzamento é efetuado com um fator de 0.8 num único ponto. O fator de Mutação é de 0.01 e a contagem de elementos elitistas é definido para 2. O Quadro 3-1 apresenta os parâmetros de controlo do algoritmo genético.

Quadro 3-1– Parâmetros de controlo do GA.

Parâmetro	$D$	<i>Crossover</i>	<i>Mutation</i>	<i>Elite count</i>
Valor	9	0.8	0.01	2

### 3.5.2. Algoritmo Colónia Artificial de Abelhas

No algoritmo ABC o parâmetro  $D$  representa a dimensão e o parâmetro  $SN = D/2$ . O parâmetro  $N$  é o número máximo de iterações e o parâmetro  $limit = SN \cdot D$  determina quando uma fonte de alimento é abandonada. A modificação de uma fonte de alimento  $x_{ij}$  na memória da abelha é definida pelo parâmetro  $MR$ . O parâmetro  $SPP = SN \cdot D \cdot 10$  representa o período de reconhecimento. O Quadro 3-2 apresenta os parâmetros de controlo do algoritmo Colónia artificial de abelhas.

Quadro 3-2– Parâmetros de controlo do ABC.

Parâmetro	$MR$	$D$	$SN$	$N$	<i>limit</i>	$SPP$
Valor	0.8	9	6	400	72	720

### 3.5.3. Algoritmo dos Pirlampos

No algoritmo dos Pirlampos o parâmetro  $n$  representa o tamanho da população e  $N$  é o número de iterações. O parâmetro  $\gamma$  é o coeficiente de absorção de luz,  $\beta$  é um parâmetro relacionado com a atracção e  $\alpha$  controla o movimento aleatório de cada pirlampo. O Quadro 3-3 apresenta os parâmetros de controlo do algoritmo dos pirlampos.

Quadro 3-3– Parâmetros de controlo do FA.

Parâmetro	$n$	$N$	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$
Valor	40	400	1	0.2	0.5

### 3.5.4. Algoritmo PSO

No algoritmo PSO o parâmetro  $n$  representa o tamanho do enxame e o parâmetro  $N$  representa o número máximo de gerações. O fator de inércia  $\alpha_{ine}$  controla a magnitude da velocidade imediatamente anterior,  $\beta_1$  é um fator cognitivo e  $\beta_2$  é um fator de social que relação os membros do grupo. O Quadro 3-4 apresenta os parâmetros de controle do algoritmo PSO.

Quadro 3-4– Parâmetros de controle do PSO.

Parâmetro	$n$	$N$	$\beta_1$	$\beta_2$	$v_{max}$	$\alpha_{ine}$
Valor	40	400	0.8	1.25	0.1	0.4 a 0.9

## 4. PROGRAMAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO

Os algoritmos genéticos são dos métodos de otimização mais encontrados na literatura, e que mais evolução apresentam desde o seu surgimento. Como método de aprendizagem, durante o estudo dos algoritmos aplicados, procedeu-se a programação de um algoritmo genético, englobando as etapas chave (Goldberg, 1989), permitindo encontrar uma solução possível respeitando todos os constrangimentos impostos. A programação do algoritmo foi feita de forma a aplicar as metodologias explanadas anteriormente. Este algoritmo será referenciado como *Programmed Genetic Algorithm* (PGA) como forma de distinção ao algoritmo Genético utilizado contido na aplicação computacional *Matlab*.

### 4.1. Descrição do Algoritmo

O PGA contempla as etapas base de um algoritmo genético, portanto o seu fluxograma é o mesmo da Figura 3-1. As etapas foram efetuadas respeitando a literatura específica e a sua programação foi efetuada na aplicação computacional *Matlab*.

O algoritmo inicia com a definição dos parâmetros, este permite que se defina o número de variáveis de projeto (`num_variav`), o tamanho da população (`tam_pop`) e o número de gerações efetuadas, que são guardadas como escalares.

De seguida é necessário definir os limites da procura para cada uma das variáveis de projeto. Os limites são guardados em dois vetores unidimensionais, (`lo`) e (`hi`) que representam os limites inferiores e superiores respetivamente.

A população inicial é obtida pela função `gera_populacao`:

```
[pops] = gera_populacao(tam_pop,num_variav,lo,hi);
```

Esta função recebe como parâmetros de entrada o tamanho da população, o número de variáveis e ambos os limites. Recorrendo a um ciclo e ao código abaixo, a função gera a população de forma aleatória, dentro dos limites impostos.

```
pops(i,j) = (lo(j)+rand*(hi(j)-lo(j)));
```

A aleatoriedade é obtida pelo comando `rand` que gera valores aleatórios, formando uma população dispersa pelo hiperespaço das variáveis de projeto, característica esta presente em todos os algoritmos com procura estocástica. A população é guardada numa matriz bidimensional tendo número de linhas igual ao tamanho da população e de colunas igual ao número das variáveis de projeto. Na primeira geração não são impostos constrangimentos, portanto a primeira população não respeita os constrangimentos e a solução pode não estar contida no espaço das soluções possíveis. No entanto, nas gerações seguintes a busca é direcionada para o espaço das soluções possíveis.

Após a geração da população inicial, o algoritmo entra no *loop* das gerações. O número de gerações é definido apenas pelo utilizador, e no PGA é considerado o único critério de

paragem, no entanto, existem muitas outras formas de critério de paragem, como por exemplo a variação mínima dos resultados obtidos.

A primeira etapa é a avaliação da população pela função objetivo. A função (`func_obj`) faz a avaliação de cada uma das populações e devolve o valor obtido pela função objetivo para cada uma. Esta função recebe como parâmetros de entrada a população gerada anteriormente e o tamanho da população.

```
func_eval = func_obj(pops, tam_pop);
```

O vetor (`func_eval`) contém os valores obtidos por cada uma das populações, ou seja, tem o mérito obtido por cada uma das populações geradas.

A aplicação dos constrangimentos é feita pelo método descrito no Capítulo 2.10.2, onde uma função calcula o valor da penalidade obtida por cada população, o qual é somado ao seu valor de mérito e multiplicado por um fator. Este fator aumenta o valor da penalidade, deslocando a solução para fora do espaço de busca, e desta forma orienta a procura para o espaço das soluções possíveis. A função (`constrangimentos`) recebe a ultima população e devolve a violação obtida.

```
const_eval(i) = constrangimentos(pops(i, :));
```

O valor da violação (`const_eval`) é multiplicado pelo fator, é depois somado ao valor da função objetivo (`func_eval`) e desta forma é obtido o valor final (`func_eval_sum`) que é utilizado para fazer a seleção dos indivíduos mais aptos e que se vão manter nas gerações seguintes como foi explicado anteriormente.

```
func_eval_sum(i) = (func_eval(i) + (const_eval(i)*1e20));
```

Os constrangimentos são representados graficamente para que seja mais fácil a identificação de populações que não os consigam cumprir e que possam se eliminados pelo utilizador na última geração. A Figura 4-1 mostra uma execução do algoritmo em que todos os constrangimentos foram respeitados para todas as populações. Se o gráfico mostrar para todas as populações a barra a cheio, ou na cota em y igual a um, significa que todas as populações respeitaram os constrangimentos e a medida de penalização é igual a zero. Se para alguma posição a barra estiver na cota zero, significa que o conjunto das variáveis de projeto guardadas na matriz das populações nessa posição, não cumpre com os constrangimentos e como tal não deve ser considerada pelo utilizador. Estas considerações devem ser tomadas na apresentação da última população, pois se os constrangimentos não forem respeitados ao longo das gerações, o próprio algoritmo orienta a busca para o espaço das soluções possíveis.

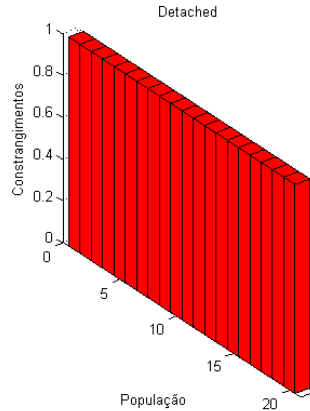


Figura 4-1 – Representação dos Constrangimentos.

A função (seleção) recebe como parâmetros de entrada os valores constrangidos da função objetivo, a população, o tamanho da população e o número de variáveis de projeto.

```
[pops_bin, pops_new, num_pop] =
selecao(func_eval_sum,pops,tam_pop,num_variav);
```

A seleção é feita por comparação dos valores obtidos no desempenho de cada população. O algoritmo está programado para encontrar o mínimo, ou seja para minimizar o problema, no entanto sem recorrer a programação o utilizador pode transformar um problema de maximização em minimização pelo princípio de dualidade descrito no capítulo 2.7. A função seleção ordena os resultados por ordem crescente e transforma cada valor da população, em código binário de 32 bits, contabilizando 16 bits para a parte inteira e 16 bits para a parte decimal. Os parâmetros de saída são a população ordenada em decimal (pops\_new) e em binário (pops\_bin). A informação binária é guardada numa matriz tridimensional.

O operador seguinte do PGA é o cruzamento (crossover). Neste operador partes de dois indivíduos são cruzados para dar origem a um ou dois novos indivíduos com informação genética dos dois progenitores em igual parte. O cruzamento é efetuado num único ponto a 50% de cada individuo. Na Figura 4-2 estão representados os genes (bits) de dois indivíduos (cromossomas).

0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0

Figura 4-2 – Representação binária de dois indivíduos.

Durante o cruzamento os dois cromossomas progenitores trocam genes entre si, dando origem a dois novos cromossomas representados na Figura 4-3.

0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1

Figura 4-3 – Representação binária de dois indivíduos após cruzamento.

A função (crossover) apenas efetua o cruzamento binário mas outras formas de cruzamento podem ser encontradas na literatura e implementadas.

```
[pops_bin_cross] =
crossover(pops_bin,pops_new,num_pop,tam_pop,num_variav,lo,hi);
```

Tem como parâmetros de entrada a população ordenada em binário (pops\_bin) e em decimal (pops\_new), o tamanho da população (tam\_pop), o número de variáveis (num\_variav) e os limites inferiores (lo) e superiores (hi) de cada variável de projeto. Como saída a função apresenta a população já com os novos indivíduos gerados no cruzamento.

O operador seguinte é a mutação. Este operador tem uma percentagem de execução muito reduzida e a sua localização é aleatória. Na Figura 4-4 está representado um cromossoma com os genes originais e com um dos genes modificado após a mutação.

0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1

Figura 4-4 – Representação binária de um indivíduo antes e depois da mutação.

Ao contrário do operador cruzamento em que são necessários dois progenitores, no operador mutação apenas um cromossoma dá origem a um novo cromossoma, pela modificação de um dos seus genes.

```
[pops] = mutacao(pops_bin_cross,tam_pop,num_variav,num_pop,lo,hi);
```

A função mutação tem as mesmas entradas que a função crossover, mudando apenas a população de entrada que já contempla o operador cruzamento. Desta função sai a nova população que inicia uma nova geração, dando seguimento ao algoritmo até que o parâmetro de paragem seja atingido. Durante a execução dos operadores cruzamento e mutação, foi detetado que alguns valores gerados saiam fora dos limites das variáveis. Portanto, após o cruzamento e após a mutação é efetuado um teste a cada variável de projeto. No caso de os limites serem ultrapassados, a variável toma o valor máximo ou mínimo do intervalo. O código abaixo efetua esta operação:

```
for i = 1:tam_pop
  for j = 1:num_variav
    if pops_bin_cross(i,j)>hi(j)
      pops_bin_cross(i,j) = hi(j);
    elseif pops_bin_cross(i,j)<lo(j)
      pops_bin_cross(i,j) = lo(j);
    end
  end
end
end
```

O PGA termina, apresentando no final das execuções, o gráfico da convergência e da distribuição das populações ao longo das gerações. A Figura 4-5 representa o gráfico da convergência para o valor mínimo encontrado pelo algoritmo.

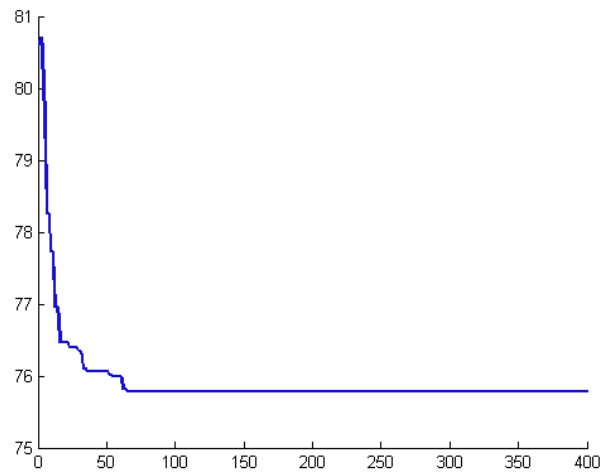


Figura 4-5 – Representação da convergência.

## 5. CICLO DE INJEÇÃO

O conjunto de operações representadas na Figura 5-1, fazem parte de um processo global que se designa de ciclo de moldação (Centimfe, 2003). Este processo contempla todas as etapas para a produção de uma peça plástica. As fases do processo são praticamente independentes da máquina de injeção, podendo o ciclo ser utilizado para descrever praticamente todos os processos de injeção. O ciclo preferencialmente deve ser feito em modo automático para que seja o mais breve possível. Este ciclo é definido pela Equação ( 23 ) e a soma das suas etapas representam o tempo necessário para executar um ciclo completo de injeção.

### 5.1.Modos de execução do ciclo moldação

O ciclo de moldação pode ser executado de três modos:

- **Manual:** o processo é comandado pelo operador. Sequência de operações morosa. Normalmente utilizado quando se está a afinar o processo e a controlar os parâmetros de máquina. Os tempos de pausa neste modo são muito frequentes.
- **Semi-automático:** O processo decorre de forma automática, mas a cada novo ciclo, o processo é interrompido e é retomado apenas com a ordem do operador. Este modo é utilizado quando a extração da peça não se consegue fazer de forma automática, ou quando há a necessidade de intervenção no molde a cada ciclo. Normalmente utilizado em máquinas que não estão a produzir em série ou em máquinas utilizadas para testar moldes novos em que a intervenção do operador é constante. Neste modo verificam-se alguns tempos de pausa.
- **Automático:** processo totalmente autónomo. Sequência de operações não carece da intervenção do operador. Modo em que se consegue maior produtividade, e onde não existem tempos de pausa.

### 5.2.Fases do ciclo de moldação

- **Fecho do Molde**

O ciclo tem início com o fechar do molde. Nesta fase as duas partes principais que constituem um molde injeção (Lado da Injeção e Lado da Extração) são prensadas entre os pratos da máquina injetora. Desta forma é garantido o total contacto entre as superfícies da junta do molde promovendo a boa qualidade da peça injetada. Esta fase deve ser tão rápida quanto possível estando a velocidade de execução limitada às características da máquina e dimensão do molde.

- **Fase da Injecção**

A injeção do material fluido, para o interior do molde, é efetuada pelo avanço linear do fuso. O fuso desloca-se axialmente como um pistão pressionando o material, que é forçado a fluir para o interior da impressão. A velocidade de injeção deve ser tomada como um compromisso entre qualidade da peça e rapidez de enchimento. Elevadas velocidades de injeção promovem o total enchimento da peça, mas podem causar defeitos na peça. O tempo de injeção é normalmente muito reduzido.

- **Fase de Pressurização**

Esta fase também, denominada de segunda pressão ou pós pressão, inicia após o enchimento da peça. A pressurização do material após o enchimento, reduz o efeito de contração por arrefecimento, contribuindo para a diminuição de empenos da peça e final, e evita o refluxo do material fundido. O excesso de pressurização pode ser prejudicial pois pode criar tensões internas na peça e dificultar a sua extração. A fase de pressurização termina quando o fundido nos canais solidifica impedindo o fluxo de material.

- **Fase de Arrefecimento e Plastização**

A fase de arrefecimento é das que mais impacto tem no ciclo de moldação. Nesta fase ocorrem dois processos simultâneos muito importantes para o ciclo.

Após a solidificação do canal de injeção o fuso da máquina roda e inicia-se a plasticização do material para o novo ciclo. O movimento de rotação obriga o material a fluir para a frente do fuso e este recua axialmente, devido à pressão, deixando um aglomerado de fundido junto ao injetor a que se dá o nome de almofada.

Simultaneamente, ocorre o arrefecimento do fundido. Este processo energético, consiste na troca de calor por difusão através do material do molde, entre o fundido e o sistema de refrigeração. O tempo de refrigeração depende da eficácia do sistema de refrigeração, da geometria e espessura da peça plástica. Elevadas velocidades de refrigeração podem causar empenos na peça, enquanto velocidades mais baixas aumentam o tempo de ciclo. A fase de arrefecimento termina assim que o fundido adquira consistência suficiente para que possa ser extraído eficazmente.

### **Fase de Abertura e Extração**

O molde é aberto normalmente em duas metades, o lado da injeção e o lado da extração. Desta forma, a peça injetada fica exposta e pronta para ser extraída. A extração da peça sucede a abertura. As chapas extratoras avançam empurrando a peça plástica, através de extratores ou outros mecanismos de desmoldação, que cair por gravidade ou retirada por um robot. De forma a reduzir a fase da extração e a tornar o processo mais autónomo, a separação do gito da peça deve ser automática, na forma de injeção submarina ou com o auxílio de um robot. Após a extração da peça, as chapas extratoras recuam e o molde fecha. O tempo utilizado por estas duas fases depende principalmente das características da máquina injetora, mas também da complexidade do molde, e do método de injeção da peça.

- **Tempo de Pausa**

Este período após a extração e antes do fecho do molde, preferencialmente deve ser zero, o que acontece normalmente quando o processo é automático. Quando remoção da peça é feita de forma manual, ou quando é necessário algum tipo de operação no molde antes do novo ciclo, o tempo de pausa deixa de ser zero.

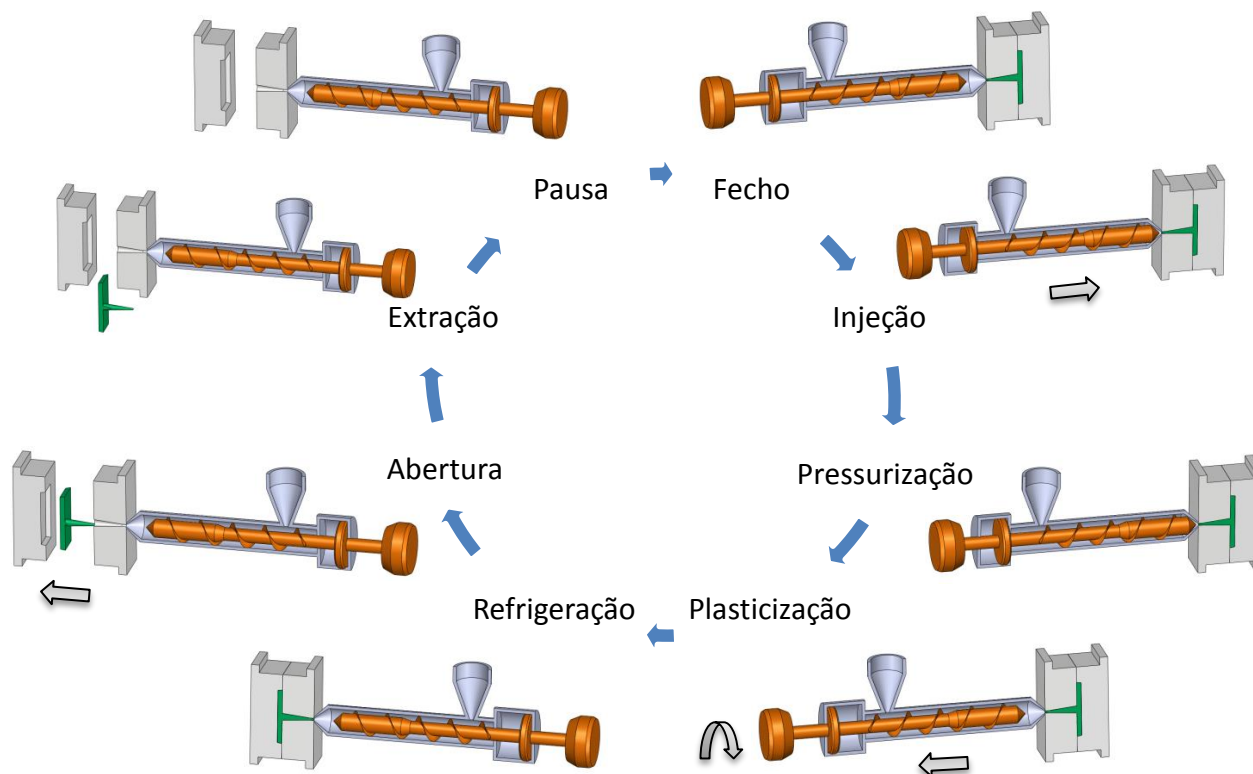


Figura 5-1 - Ciclo de Moldação (Centimfe, 2003).

De forma a ser possível processar os tecidos pré-impregnados, o ciclo de injeção convencional foi modificado. Algumas etapas adicionais são necessárias para que o molde e o tecido sejam preparados. Na Equação ( 40 ) estão contabilizadas as novas etapas necessárias e na Figura 5-2 estão representadas graficamente cada uma delas em função da temperatura a que ocorrem. Uma aproximação a este problema foi previamente efetuada pelos autores (Carreira, Alves, Ramos, & Bártolo, 2013).

Duas temperaturas são consideradas, a temperatura de moldação  $T_{melt}$  e a temperatura de desmoldação  $T_{demol}$ . Ambas estão definidas dentro de um determinado intervalo pelo polímero a processar, e ambas são selecionadas pelo otimizador. A temperatura de moldação tem principal influência nos tempos de ciclo e a temperatura de desmoldação é alcançada apenas quando a peça plástica atingir consistência suficiente para que seja extraída sem ser danificada.

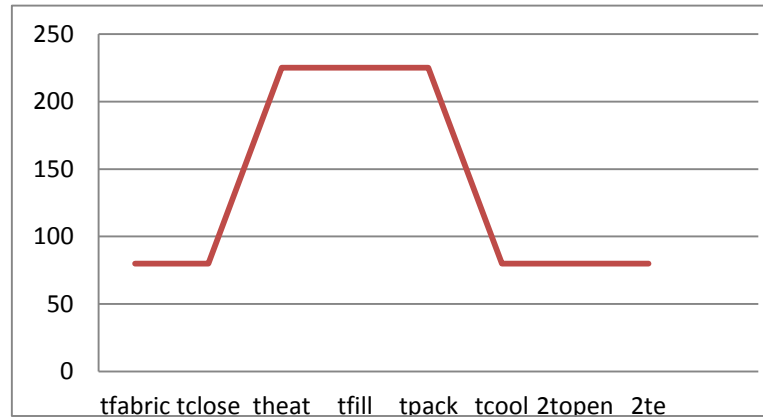


Figura 5-2 - Canal de Injeção Submarina

O novo ciclo inicia-se com a colocação do tecido no molde  $t_{fabric}$ , esta fase está dependente da velocidade da máquina que coloca o tecido e é efetuada à temperatura de desmoldação. O molde é fechado  $t_{close}$ , ficando o tecido comprimido nas superfícies de junta e no interior das cavidades moldantes. Inicia-se o aquecimento  $t_{heat}$ , até se atingir a temperatura de moldação. Este procedimento é executado de forma a promover a adesão entre os dois materiais, isto é, eleva-se a temperatura do polímero impregnado para que este esteja nas mesmas condições de processamento que o polímero injetado. Assim que o molde atinge a temperatura necessária, são efetuadas as fases do enchimento  $t_{fill}$ , e do empacotamento  $t_{pack}$ , como num molde convencional. Durante a fase  $t_{cool}$  tanto o molde como a peça plástica são arrefecidos até à temperatura  $T_{demol}$ . O molde é depois aberto e é efetuada a extração da peça, ( $t_e$ ) com os dois materiais, a matéria plástica e o tecido. Este conceito pretende unificar duas tecnologias já existentes, a termoformação, e a injeção sobre tecido num único processo tecnológico.

### 5.3. Formulação matemática do ciclo de Injeção

O processo convencional de injeção, é entendido, como compreendendo as cinco etapas chave do processo, onde a injeção é efetuada por canais frios, seguida por um período de refrigeração e compactação e posterior abertura do molde e extração. A seguinte formulação compreende o processo convencional de injeção. O cálculo do tempo total de injeção  $t_c$  pode ser efetuado pela soma das cinco etapas principais do processo de injeção. Estas cinco etapas contemplam as outras sub etapas necessárias ao processo.

#### 5.3.1. Formulação do problema Mono-objetivo

O processo foi inicialmente modelado considerando que a abertura e extração como sendo efetuadas na mesma etapa (Ferreira, I., Weck, Saraiva, & Cabral, 2009). Separando a extração e abertura do molde em duas etapas diferentes, pois ambas têm parâmetros isolados de análise, deu origem a uma nova formulação apresentada de seguida (Ramos, Carreira, Alves, & Bártolo, 2012):

$$t_c = t_{fill} + t_{pack} + t_{cool} + 2 \cdot t_{open} + 2 \cdot t_{ext} \quad (23)$$

Onde  $t_{fill}$  representa o tempo de enchimento do molde; o  $t_{pack}$  representa o tempo de empacotamento, também designado por segunda pressão;  $t_{cool}$  é o tempo necessário de arrefecimento da peça, pelo menos até que esta adquira consistência suficiente para que possa ser extraída sem ser danificada;  $t_{open}$  é o tempo de abertura que se considera igual ao tempo de fecho e  $t_{ext}$  é o tempo do avanço da extração que também se considera igual ao tempo de recuo. A soma destas etapas permite obter o tempo aproximado do tempo necessário para injeção de qualquer peça plástica.

O tempo de enchimento  $t_{fill}$  pode ser obtido através do volume necessário para encher a cavidade e pelo caudal fornecido:

$$t_{fill} = \frac{V_{part} + V_{feed}}{Q_{melt} \cdot f} \quad (24)$$

O caudal  $Q_{melt}$  é obtido por (Crawford, 1998):

$$Q_{melt} = \frac{\pi \cdot t^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L} \quad (25)$$

E a desta forma a equação do tempo de enchimento pode ser reescrita como:

$$t_{fill} = \frac{(V_{part} + V_{feed}) \cdot 8 \cdot \mu \cdot L}{(\pi \cdot t^4 \cdot \Delta P) \cdot f} \quad (26)$$

Onde  $V_{part}$  é o volume necessário de material para a peça plástica;  $V_{feed}$  é o volume dos canais de alimentação desde o ponto de injeção até ao ataque à peça;  $f$  é o coeficiente de atrito entre o material plástico injetado e o aço da cavidade;  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade do plástico injetado;  $L$  é o comprimento total desde o ponto de injeção até à extremidade oposta ao ponto de ataque à peça;  $t$  é a espessura principal da peça plástica e  $\Delta P$  é a queda de pressão verificada durante o processo de enchimento. Pressupõe-se que no final do tempo de enchimento, ambos peça e canais de injeção estão completamente cheios.

Durante o arrefecimento, o material plástico vai contrair, e a perda de volume vai originar peças defeituosas. A fase da compactação (Beaumont, Sherman, & Nagel, 2002) tende a repor o volume de material perdido durante a contração. Este processo, obrigatoriamente tem de ser efetuado durante e após o arrefecimento, com o material ainda numa fase viscosa e que permita o seu escoamento. O tempo necessário para a fase de empacotamento é formulado da seguinte forma (Menges, Walter, & Mohren, 2001):

$$t_{pack} = \frac{\bar{S}_{gate}^2}{\pi^2 \cdot \alpha_{dif}} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} \cdot \left( \frac{T_{melt} - T_{cool}}{T_{demol} - T_{cool}} \right) \right] \quad (27)$$

Onde  $T_{melt}$  é a temperatura de processamento para o material injetado;  $T_{cool}$  é a temperatura do molde imposta pela circuito de refrigeração;  $T_{demol}$  a temperatura de extração onde o material adquire consistência suficiente;  $S_{gate}$  a espessura do filme do ataque à peça e  $\alpha_{dif}$  a difusividade térmica. Como o filme tem saída negativa no sentido do deslocamento do fluido vai ser utilizada uma espessura média  $\bar{S}_{gate}$  obtida por:

$$\bar{S}_{gate} = S_{gate} + \tan(\beta_{gate}) \cdot \ell_{gate} \quad (28)$$

Onde  $\beta_{gate}$  é o ângulo do gate e  $\ell_{gate}$  o seu comprimento.

A fase, do ciclo de injeção, que necessita mais tempo, é a fase de arrefecimento. Nesta fase o calor é extraído da peça plástica através do aço, por difusão térmica, para o fluido que circula nos canais de arrefecimento. O tempo necessário para que este processo de troca de energia foi formulado da seguinte forma (Menges, Walter, & Mohren, 2001):

$$t_{cool} = \frac{d_{runner}^2}{23.1 \cdot \alpha} \cdot \ln \left[ 0.692 \cdot \left( \frac{T_{melt} - T_{cool}}{T_{demol} - T_{cool}} \right) \right] \quad (29)$$

A abertura do molde para que a peça seja exposta, é seguida pelo avanço da extração de forma a extrair a peça. Depois de retirada a peça de dentro do molde, a extração recua, considerando-se que o tempo de recuo é igual ao tempo de avanço, e de seguida o molde

fecha. De igual forma, o tempo de fecho é igual ao tempo de abertura do molde. Após o fecho do molde inicia-se um novo ciclo de injeção. Para se calcular a abertura do molde pode-se recorrer à formulação da velocidade de abertura genérica para qualquer máquina de injeção (Kazmer, 2007):

$$V_{open} = \left[ 184 + 13 \cdot \log \left( \frac{F_{clamp}}{F_{ref}} \right) \right] \cdot 10^{-3} \quad (30)$$

Na equação acima  $F_{ref}$  é uma força de referencia de 1 tonelada e  $F_{clamp}$  é a força de fecho da máquina, responsável por manter o molde fechado durante a injeção. A força de fecho tem de ser superior à força causada pela pressão de injeção para que o molde não abra e a peça final saia nas condições esperadas.

$$F_{clamp} = P_{inj} \cdot A_{proj} \quad (31)$$

A pressão de injeção  $P_{inj}$  é um parâmetro referente ao material a injetar e  $A_{proj}$  representa a área da peça projetada no plano da máquina. Isto é, é a área máxima da peça, projetada no plano normal ao fluxo de injeção.

O curso da extração  $d_e$  deve ser suficiente para que possibilite a queda livre das peças moldadas (Centimfe, 2003), desta forma, pode-se adotar a aplicação de um fator de segurança ao tamanho máximo da peça  $Z_{part}$ , no eixo de desmoldação. Este fator deve ser estudado e modificado na formulação em função da dimensão e geometria da peça a injetar.

$$d_e = 2.5 \cdot Z_{part} \quad (32)$$

De igual modo, a abertura máxima do molde tem de considerar o avanço da extração e a queda livre da peça. Um novo fator  $sec$ , com 60% (Centimfe, 2003) do avanço da extração, deve ser aplicado para encontrar o valor da abertura do molde:

$$MaxOpen = d_e \cdot sec \quad (33)$$

Desta forma, o tempo necessário para a abertura do molde é dado por:

$$t_{open} = \frac{MaxOpen}{\left[ 184 + 13 \cdot \log \left( \frac{P_{inj} \cdot A_{proj}}{9.8 \cdot F_{ref} \cdot 10^3} \right) \right] \cdot 10^{-3}} \quad (34)$$

O tempo de extração, apesar de ser negligenciado por muitos autores por ter um valor baixo, deve ser tido em consideração de forma a aproximar mais o modelo ao tempo real de ciclo. A força necessária foi formulada da seguinte forma:

$$F_{ext} = \mu \cdot \cos(\theta) \cdot E \cdot CTE \cdot A_c \cdot (T_{cool} - T_{demol}) \quad (35)$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito estático,  $\theta$  é o ângulo de saída com a direção da extração,  $E$  é o módulo de elasticidade do material plástico,  $CTE$  é o coeficiente de expansão térmica e  $A_c$  a área de contacto. Considerando o molde como um sistema dinâmico podemos dizer que:

$$F_{ext} = m_e \cdot a_e \quad (36)$$

A massa considerada será a da peça e a dos canais de injeção e pode ser definida como:

$$m_e = m_{part} + m_{feed} = (V_{part} + V_{feed}) \cdot \rho_{mat} \quad (37)$$

Onde  $\rho_{mat}$  representa a densidade do material a injetar.

Desta forma o tempo necessário para extrair a peça pode ser aproximado por:

$$t_{exp} = \left[ \frac{m_e \cdot d_e}{F_{ext}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

Juntadas todas as parcelas de tempo, ocupadas pelas várias etapas, podemos definir a equação (23) para o cálculo do tempo de ciclo de injeção como:

$$t_c = \frac{(V_{part} + V_{feed}) \cdot 8 \cdot \mu \cdot L}{(\pi \cdot t^4 \cdot \Delta P) \cdot f} + \frac{\bar{S}_{gate}^2}{\pi^2 \alpha_{dif}} \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} \cdot \left( \frac{T_{melt} - T_{cool}}{T_{demol} - T_{cool}} \right) \right] +$$

$$\frac{d_{runner}^2}{23.1 \cdot \alpha_{dif}} \ln \left[ 0.692 \cdot \left( \frac{T_{melt} - T_{cool}}{T_{demol} - T_{cool}} \right) \right] +$$

$$\frac{MaxOpen}{\left[ 184 + 13 \cdot \log \left( \frac{P_{inj} \cdot A_{proj}}{9.8 \cdot F_{ref} \cdot 10^3} \right) \right] \cdot 10^{-3}} +$$

$$\left[ \frac{m_e \cdot d_e}{F_{ext}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

Na injeção sobre o tecido, e de forma a ser possível o processamento e a otimização da qualidade da peça final houve a necessidade de adicionar algumas etapas à equação(39), (Carreira, Alves, Ramos, & Bártolo, 2013).

$$t_c = t_{fabric} + t_{heat} + t_{close} + t_{fill} + t_{cool} + t_{pack} + 2 \cdot t_{open} + 2 \cdot t_{ext} \quad (40)$$

Onde o  $t_{fabric}$  é o tempo necessário para colocar o tecido no interior do molde,  $t_{heat}$  é o tempo necessário para aquecer as zonas moldantes para a temperatura de processamento.

De forma a minimizar o tempo gasto na colocação do tecido no molde, este processo vai ser executado por um braço mecânico, previamente programado. O tempo gasto é calculado em função das características do autómato por:

$$t_{fabric} = \frac{esp}{vel} \quad (41)$$

Onde  $vel$  é a velocidade de deslocamento do braço e  $esp$  o espaço percorrido. O cálculo do tempo necessário para o aquecimento do molde é obtido pelo balanço energético entre o calor fornecido e o que se perde. A energia térmica  $Q_h$ , é fornecida por resistências colocadas no interior do molde junto à zona moldante de forma a minimizar as perdas. O calor flui por condução e perde-se para o ar  $Q_c$ , por convecção. Neste balanço energético a maioria da energia fica acumulada,  $Q_m$ , nas zonas moldantes aumentando a temperatura. O balanço energético é expresso por:

$$Q_h + Q_c = Q_m \quad (42)$$

A equação anterior expressa em termos de potência é reescrita na forma de:

$$P_R + A_{ext} \cdot h \cdot (T_\infty - T(t)) = \rho \cdot C_p \cdot (A_{ext} - A_{int}) \cdot L \cdot \frac{dT(t)}{dt} \quad (43)$$

No lado esquerdo da equação  $P_R$  é a potência fornecida pelas resistências,  $A_{ext}$  é a área exterior da bucha,  $h$  é o coeficiente de convecção térmica,  $T_\infty$  é a temperatura ambiente e  $T(t)$  é a temperatura a qualquer instante. Do lado direito da equação,  $\rho$  é a densidade do material,  $C_p$  é o Calor específico,  $A_{int}$  é a área interna da bucha, que está em contacto com as resistências e  $L_B$  é o comprimento da bucha.

Considerando:

$$Q = \frac{P_R}{\rho \cdot C_p \cdot (A_{ext} - A_{int}) \cdot L_B} \quad (44)$$

E considerando:

$$m = \frac{A_{ext} \cdot h}{\rho \cdot C_p \cdot (A_{ext} - A_{int}) \cdot L_B} \quad (45)$$

A Equação (43) pode ser reescrita na forma diferencial como:

$$Q = m \cdot \theta(t) + \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (46)$$

Considerando que:

$$\theta(t) = T(t) - T_{\infty} \Rightarrow \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{dT(t)}{dt} \quad (47)$$

A solução para a equação diferencial é dada por:

$$\theta(t) = C \cdot e^{-m \cdot t} + \theta_p \quad (48)$$

Onde  $C$  é uma constante de integração e  $\theta_p$  é a solução particular da equação que é dada por:

$$\theta_p = \frac{Q}{m} = \frac{P_R}{A_{ext} \cdot h} \quad (49)$$

Considerando:

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (50)$$

No instante de tempo  $t = 0$ , a constante  $C$  é dada por:

$$C = \theta_0 - \frac{Q}{m} \quad (51)$$

E a temperatura em qualquer instante de tempo das paredes exteriores da bucha é dada por:

$$\theta(t) = \theta_0 \cdot e^{-m \cdot t} + (1 - e^{-m \cdot t}) \cdot \frac{Q}{m} \quad (52)$$

### 5.3.2. Constrangimentos ao problema

O problema do ciclo de injeção está sujeito a alguns constrangimentos de forma a garantir que o resultado do problema seja possível. Como não se trata de um molde convencional a abertura do molde não é executada na mesma direção da extração da peça, o que implica que alguns constrangimentos sejam adaptados para este novo conceito de molde.

A pressão de injeção aplicada sobre o material fluido tem de ser suficiente para vencer o atrito dinâmico do escoamento (Menges, Walter, & Mohren, 2001):

$$\frac{32 \cdot (\ell_{runner} + \ell_{gate} + \ell_{part}) \cdot \varphi_{dim} \cdot \bar{v}_F \cdot \eta_{aev}}{\left(\frac{2MaxY \cdot t}{MaxY + t}\right)^2} - P_{inj} \leq 0 \quad (53)$$

Onde  $\ell_{runner}$  é o comprimento dos canais de injeção,  $\ell_{gate}$  é o comprimento do cone de injeção, e  $\ell_{part}$  o comprimento da peça plástica a injetar.  $\varphi_{dim}$  é uma constante referente à

dimensão da peça, e normalmente toma o valor de 1.5 quando a dimensão da largura da peça é muito maior que a espessura.  $\bar{v}_F$  é a velocidade da frente de fluxo do material,  $\eta_{aev}$  é a viscosidade aparente efetiva e  $MaxY$  a dimensão máxima no eixo  $Y$ .

A força causada pela pressão de injeção não deve ultrapassar a força máxima de fecho da máquina  $F_{clamp}$ :

$$P_{inj} - \frac{F_{clamp}}{A_{proj}} \leq 0 \quad (54)$$

A taxa de corte nos pontos de injeção tem de ser inferior à taxa limite de rotura, a “Power Law” é assumida:

$$d_{gate} + 2 \left[ \frac{(3 + 1/n) \cdot \dot{V}}{\pi \dot{\gamma}_{max}} \right]^{\frac{1}{3}} \leq 0 \quad (55)$$

Onde  $n$  é o índice de potência da “Power law”,  $\dot{V}$  é o caudal de material plástico e  $\dot{\gamma}_{max}$  a tensão máxima de corte do material plástico.

A abertura do molde tem de ser suficiente para deixar livre as faces exteriores do molde:

$$Max_y \cdot 1.5 - d_{release} \leq 0 \quad (56)$$

O avanço da extração tem de ser suficiente para garantir a livre extração da peça:

$$1.5 \cdot Z_{part} - d_e \leq 0 \quad (57)$$

O volume dos canais de injeção  $V_{feed}$  deve ter no máximo 30% do volume da peça  $V_{part}$ :

$$V_{feed} - 0.3 \cdot V_{part} \leq 0 \quad (58)$$

E é obtido por:

$$V_{feed} = \frac{\pi}{4} (n_{downstream} n_{ramif} d_{runner}^2 l_{runner}) + s_{gate} w_{gate} l_{gate} n_{gate} \quad (59)$$

Onde  $n_{ramif}$  é o número de ramificações do canal de injeção e  $n_{gate}$  o número de pontos de injeção.

A queda de pressão, que ocorre durante o enchimento, não deve ultrapassar metade da pressão de injeção:

$$\Delta P - 0.5 \cdot P_{inj} \leq 0 \quad (60)$$

A minimização da perda de pressão é determinada usando a equação de movimento, em que a força devido à queda de pressão ao longo do fluxo (causada pelo fluxo viscoso no canal) deve ser igual à força resultante das tensões de corte e ambas ocorrem ao longo do comprimento do fluxo de material fundido. Usando o modelo da “*Power Law*”, que diz que a viscosidade é uma função exponencial da taxa de corte, pode-se estimar a queda de pressão, em função do caudal ao longo de todo o canal de injeção:

$$\Delta P = \frac{4kl_{runner}}{d_{runner}} \left[ \frac{(3 + 1/n) \cdot \dot{V}}{\pi \left( \frac{d_{runner}}{2} \right)^3} \right]^n + \frac{2kl_{gate}}{s_{gate}} \left[ \frac{2 \left( 2 + \frac{1}{n} \right) \dot{V}}{w_{gate} s_{gate}^2} \right]^n \quad (61)$$

Onde  $k$  é a viscosidade de referência do polímero à temperatura de processamento.

### 5.3.1. Formulação do problema Multi-objectivo

Para efetuar o estudo multi-objetivo, duas das funções que no problema mono-objetivo eram apenas constrangimentos do problema, foram adicionadas como prioritárias. Além de otimizar a equação ( 40 ) do tempo de ciclo pretende-se também a diminuição da queda de pressão, Equação( 61 ), responsável por defeitos nas peças plásticas e também a minimização do volume de material nos sistemas de alimentação, Equação ( 59 ). A formulação do problema é efetuada considerando as três equações atrás citadas como funções objetivo. Ou seja, ao invés de se considerar uma função a otimizar, vão ser consideradas três funções objetivo. De um problema multi-objetivo não se consegue retirar uma solução ótima da mesma forma que se faz num problema mono-objetivo, é necessário uma agente de decisão que perante a frente de Pareto apresentada pelo algoritmo efetue a seleção das soluções que melhor satisfazem os seus critérios.

## 6. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Neste capítulo é efetuada a caracterização dos materiais que se pretende processar. Os dois polímeros aqui apresentados foram selecionados por serem ambos polímeros de engenharia ou superiores, uma vez que a sua finalidade é criar peças de elevadas características mecânicas. Os tecidos pré impregnados que se pretendem utilizar vão ser também apresentados. Uma descrição da sua apresentação, propriedades e aplicações mais comuns vão ser expostos mais à frente. Os materiais poliméricos há muito que estão presentes em praticamente todos os objetos físicos que nos rodeiam. A facilidade de processamento, o custo não muito elevado e as características estéticas e funcionais que as peças produzidas em polímeros oferecem, tornam-nas a escolha ideal para uma grande diversidade de aplicações. As elevadas características mecânicas que alguns polímeros apresentam permitem a substituição de alguns materiais mais caros. Em mercados como o automóvel, onde se procura a redução de peso de forma a diminuir o consumo de combustível, peças em materiais poliméricos são parte integrante de todas as gamas do mercado. Os materiais poliméricos são formados por três grandes grupos, os polímeros termoplásticos, os polímeros termoendurecíveis e as borrachas e elastómeros, onde cada grupo apresenta as suas características específicas. Os materiais abordados neste trabalho pertencem ao grupo dos polímeros termoplásticos, que serão descritos mais à frente, e serão enunciadas as suas propriedades específicas. As propriedades bem conhecidas dos materiais abordados, tornam-nos a seleção ideal para a produção de peças de elevado desempenho. Ambos os materiais apresentam características mecânicas bastante elevadas e ambos são polímeros semi-cristalinos o que lhes confere determinadas propriedades descritas de seguida. Devido principalmente às suas características mecânicas, são ainda distinguidos em dois grupos funcionais, a Poliamida pertence ao grupo dos polímeros de Engenharia e o PEEK pertence ao grupo dos polímeros de elevado desempenho.

O objetivo principal é a obtenção de peças funcionais híbridas, a partir da injeção de polímero sobre tecido de fibras pré-impregnado com materiais também poliméricos. De forma a promover a adesão e para que esta seja uniforme, é importante injetar o mesmo polímero que se encontra impregnado no tecido dentro das mesmas condições de processamento. A escolha destes dois polímeros, prende-se principalmente pela disponibilidade dos tecidos no mercado, no entanto, como o produto final tem aplicações funcionais, em que está sujeita a esforços mecânicos, é importante que os polímeros utilizados sejam, no mínimo, polímeros de Engenharia.

### 6.1. Polímeros termoplásticos

O termo polímero (*poli-mero*) significa muitas partes. Um material polimérico é considerado um sólido formado por muitas partes, ou unidades, ligadas quimicamente entre si. Os polímeros são caracterizados principalmente em três grupos: o grupo dos termoplásticos, o grupo dos termoendurecíveis e o grupo das borrachas e elastómeros. Os materiais

termoplásticos, também designados só por plásticos, constituem um grupo muito vasto e variado de materiais sintéticos, que são normalmente processados por injeção e conformação. Apesar da existência destes três grupos apenas se vão abordar os polímeros termoplásticos que são os que englobam os materiais que se pretende processar. Existe atualmente no mercado uma grande variedade de polímeros termoplásticos, sendo que os mais utilizados em injeção estão representados na Figura 6-1, diferenciados por duas caracterizações específicas, relativamente à sua aplicação e ao arranjo molecular. Os três grupos relativos à aplicação são diferenciados pelas características que cada polímero apresenta. Os grupos são: os polímeros de grande consumo, os polímeros de engenharia e os polímeros especiais ou de elevado desempenhamos.

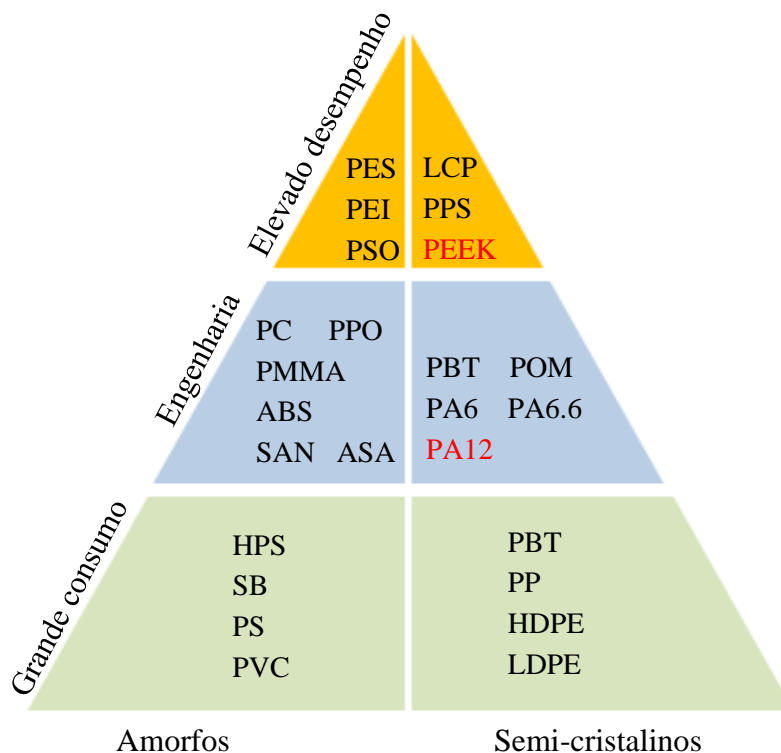


Figura 6-1 – Pirâmide dos polímeros. (Goodship, 2004)

Ao arrefecerem e solidificarem, o arranjo das cadeias moleculares poliméricas dá-se de duas formas distintas. Na Figura 6-2 estão representadas as duas caracterizações possíveis relativamente à sua estrutura molecular, à direita na Figura B, as cadeias moleculares arrumadas e bem orientadas são características dos polímeros semi-cristalinos.

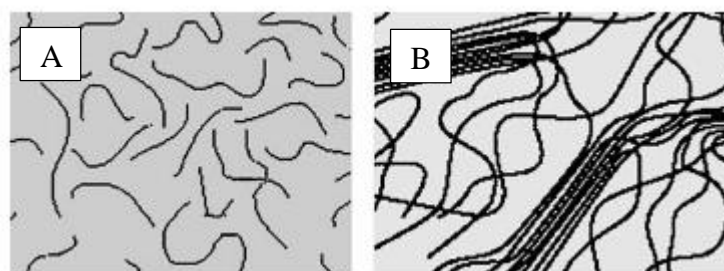


Figura 6-2 - Materiais amorfos (A) e Semi-cristalinos (B). (Goodship, 2004)

À esquerda, Figura A, a forma desorganizada das cadeias moleculares, sem nenhuma orientação predominante, é característica dos materiais amorfos. O grau de cristalinidade depende do comprimento das cadeias do polímero, da viscosidade e das temperaturas do fundido e do molde (DSM, 2000). Ambos os polímeros termoplásticos estudados pertencem ao grupo dos semi-cristalinos. Uma forma de identificação visual de cada um dos grupos é que os materiais semi-cristalinos são opacos, enquanto os amorfos são transparentes.

Os polímeros termoplásticos necessitam de calor para serem moldados e depois de arrefecerem mantêm a forma que adquiriram durante o estágio da moldação. Este processo pode ser repetido sem que haja perdas significativas de propriedades. A maioria dos termoplásticos é constituída por cadeias principais muito longas, de átomos de Carbono ligadas covalentemente, onde também podem surgir átomos de Azoto, Oxigénio ou Enxofre. As cadeias moleculares longas dos termoplásticos, estão ligadas umas às outras por ligações secundárias (Smith, 1998).

## 6.2. Poliamida (PA)

As poliamidas (PA) são polímeros sobretudo semi-cristalinos apesar de também existirem poliamidas amorfas. As poliamidas são polímeros de condensação e a sua origem está ligada à polimerização por condensação, do qual resultou a síntese do PA 6.6 e o material comercial designado por *Nylon*. A primeira Poliamida foi sintetizada por Wallace Carothers em 1935 na empresa *DuPont*.

As PA são distinguidas pelo número de átomos de Carbono dos monómeros que as formam. Por exemplo, a PA 6 é feita de um tipo de monómero, com 6 átomos de C na unidade repetitiva. No caso da PA 6.10 esta é formada por dois tipos diferentes de monómero, um dos quais tem 6 átomos de carbono e outro com 10 átomos de C. Ou seja, uma forma de identificação é pela referência da poliamida, onde as referências com números são polímeros semi-cristalinos. Na Figura 6-3 estão representadas as estruturas químicas de duas poliamidas.

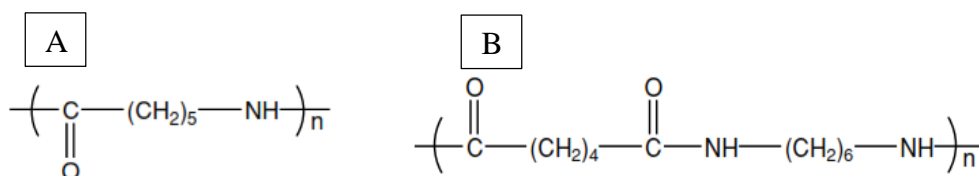


Figura 6-3 - Estrutura da PA 6 (A) e Estrutura da PA 6.6 (B). (Goodship, 2004)

A densidade e a quantidade de água que absorvem são propriedades a ter em consideração na seleção das poliamidas. As propriedades das poliamidas são altamente afetadas pelo grau de cristalinidade e pela quantidade de água que incorporam (Goodship, 2004). Uma primeira análise possível da tabela é que quanto mais complexas são as moléculas da PA, ou seja, quantos mais átomos de Carbono por monómero (maior cristalinidade), menor será a

quantidade de água possível de absorver. Desta forma a absorção de humidade é inversamente proporcional à cristalinidade da poliamida. De igual forma também as propriedades mecânicas como rigidez e dureza tendem a diminuir com o aumento da quantidade de água. O preço tende a subir com o grau de cristalinidade.

As PA mais comuns em injeção, as respetivas densidades e percentagem de absorção de água estão apresentadas no Quadro 6-1.

Quadro 6-1– Propriedades das Poliamidas (densidade e % de absorção de água).

Tipos mais comuns de PA		
Tipo	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Absorção de água [%]
PA 6	1.12 - 1.15	2.8 - 3.2
PA 6.6	1.12 - 1.15	2.5 - 2.7
PA 6.10	1.06 - 1.08	1.2 - 1.4
PA 11	1.04	0.8 - 0.9
PA 12	1.01 - 1.02	0.7 - 0.8
PA amorfa	1.06 - 1.08	0.3 - 1.1

### 6.2.1. Propriedades

- Elevada rigidez e dureza e elevada resistência ao desgaste.
- Baixo coeficiente de atrito.
- PA 6.6 apresenta mais elevada rigidez e dureza e elevada resistência ao desgaste.
- Higroscópicas
- Aumento de humidade aumenta a tenacidade e diminui a rigidez.
- Diminuição da humidade diminui a tenacidade e aumenta a fragilidade.
- Gama de Temperaturas de aplicação entre os -40 a 80/120 °C dependendo do tipo, podendo por breves instantes serem aplicadas a 140/210 °C.
- Parcialmente autoextinguíveis.
- Baixa tendência a agarrar pó devido à absorção de água à superfície.
- Boa resistência à fluência.
- Elevada resistência à fadiga
- Boa resistência ao impacto.
- Ótimas propriedades mecânicas.
- Baixa tendência à fratura frágil.
- Boa resistência a óleos, solventes e ao meio ambiente.
- Impermeável a gases.
- PA 6 e PA 6.6 são mais propícias à absorção de água o que as torna dimensionalmente instáveis.

As propriedades mecânicas das Poliamidas estão representadas no Quadro 6-2. As poliamidas pertencem ao grupo de polímeros de engenharia e apresentam elevadas propriedades mecânicas sendo bastante utilizadas na substituição de materiais metálicos em muitas aplicações.

Quadro 6-2– Propriedades técnicas das Poliamidas (Ashby & Jonhson,

Propriedades Técnicas		
Módulo de elasticidade	GPa	0.67 a 4.51
Alongamento	%	4 a 1210
Resistência à fratura	MPa · m <sup>1/2</sup>	0.58 a 8.03
Densidade	Mg/m <sup>3</sup>	1 a 1.42
Dureza	Hv	6 a 28
Tensão de Rotura	MPa	20.7 a 101.6
Temperatura de Serviço	C	- 80 a 120
Calor específico	J/kg · K	1421 a 2323
Condutividade térmica	W/m · K	0.18 a 0.35
Expansão térmica	10 <sup>-6</sup> /K	50.4 a 216
Capacidade Energética	MJ/kg	110 a 120
Potencial de Reciclagem	Alto	
Aspetto	Baço para opaco	

### 6.2.2.Principais aplicações

As poliamidas devido às características mecânicas que apresentam são principalmente utilizadas em aplicações sujeitas a tensões devido a fricção e desgaste. As poliamidas com maior aplicação são as PA 6, PA 6.6 e PA 12 que apresentam elevada tenacidade com bom comportamento ao desgaste e à fadiga. O fato de conciliarem uma elevada resistência mecânica, química e ambiental, torna este material indicado para aplicações de elevado carregamento, mesmo em condições de serviço severas (Centimfe, 2003). Este tipo de polímeros tem uma aceitação muito boa à incorporação de fibras de vidro, cargas minerais, pigmentos, estabilizadores, lubrificantes e modificadores de impacto.

As PA em geral são utilizadas em peças sobretudo sujeitas a atrito dinâmico, sob a influência de tensões devido ao desgaste, como elementos de deslize, acoplamentos em esfera, rolamentos de esfera e rolos, cames, ferramentas elétricas, motores elétricos, bombas, etc. Têm grande aplicação na indústria automóvel, principalmente em peças no compartimento do

motor, carcaças de máquinas elétricas como berbequins e serras e em todo o tipo de engrenagens.

A absorção de água é um parâmetro que restringe a sua aplicação em determinadas aplicações e quem o rigor dimensional é importante. Por exemplo as PA 6 e PA 6.6 apresentam um elevado índice de absorção de água, ficando o comportamento mecânico e estrutural fortemente dependente do respetivo teor de humidade. Este fator, apesar de ter um efeito negativo no rigor dimensional pois altera significativamente as peças, tem também um efeito positivo de as tornar menos frágeis. Na realidade estas Poliamidas devem ser aplicadas com um nível de saturação aproximadamente de 8% em massa de forma a torna-las menos frágeis. As PA 11 e PA 12 apresentam um fator de absorção de água mais baixo o que lhes garante um maior leque de aplicações em que o rigor dimensional é pretendido. São também caracterizadas por uma maior flexibilidade e apresentam ainda uma excecional inércia química e resistência ambiental, sendo por isso muito utilizadas na indústria química, alimentar e produtos médicos.

### **6.2.3. Processamento por injeção**

Antes de serem processadas as poliamidas necessitam de se ser secas, normalmente também se usa o termo estufadas. Este processo consiste em retirar a humidade retida no interior do polímero. Pode ser efetuado em estufas, ou mesmo na tremonha, e deve permanecer num ambiente isolado a uma temperatura aproximadamente de 80 °C durante algumas horas. A humidade deve ser retirada pois prejudica o processo de injeção. Material com muita humidade causa um efeito de ondulado e compromete as propriedades mecânicas na peça depois de injetada. Este processo inicial não ser executado se o material for fornecido em embalagens hermeticamente seladas. Outros fatores podem levar ao anulamento da secagem, no entanto cada caso deve ser analisado, para se poder determinar se é compensatório em termos económicos e em termos de qualidade final da peça. Os fatores mais comuns de análise são a geometria e a aplicação da peça, e os custos associados à secagem. Cada tipo de poliamida tem uma temperatura de processamento, no entanto, esse valor é tipicamente 10 a 40 °C acima da temperatura de fusão. No caso de surgirem dificuldades na injeção, deve-se aumentar a temperatura gradualmente nas zonas do cilindro, de forma crescente em direção ao bico de injeção. A permanência do material dentro do bico de injeção deve ser a menor possível. Longos períodos dentro do cilindro levam o material a oxidar, ou seja, ganha uma coloração amarelada. As poliamidas semi-cristalinas têm uma temperatura de fusão bem definida, portanto tem de se garantir que o ataque à peça não solidifica precocemente, para que a contrapressão possa ser eficaz e seja possível estar aplicada o tempo necessário para compactar a peça de forma eficaz. As dimensões do ataque, as temperaturas do molde e do fundido devem ser as corretas para que o processo de injeção seja bem-sucedido e se consiga obter uma boa moldação.

No Quadro 6-3 estão representadas as temperaturas típicas de processamento dos principais tipos de Poliamidas.

Quadro 6-3– Temperaturas de processamento das Poliamidas (Goodship, 2004).

Poliamida	Temperatura [°C]
PA 6	215
PA 6.6	250
PA 6.10	200
PA 11	187
PA 12	177

A temperatura típica do molde para a injeção de qualquer poliamida é numa gama entre os 50 a 90 °C. Se for desejável maior cristalinidade é possível mover a janela de processamento para uma gama de 100 a 120 °C. Uma maior cristalinidade diminui o efeito de contração. Se o grau de cristalinidade for demasiado baixo pode-se aumentar recorrendo a tratamentos térmicos específicos. Tipicamente a resistência ao desgaste aumenta proporcionalmente com o grau de cristalinidade (Goodship, 2004).

As poliamidas no estado fundido têm um bom escoamento. Tornam-se muito fluidas, e com um índice de viscosidade muito baixo. A elevada fluidez tem tendência a criar rebarbas em moldes com o ajustamento fraco. É aconselhado o uso de sistemas valvulados para evitar que os bicos vertam material, fenómeno conhecido como “babar”.

As poliamidas, durante o processamento, sofrem alguma variação da contração. Os valores de contração variam entre os 0.2 e 2.5%, dependendo do tipo e da carga. A contração volumétrica depois da extração tende a diminuir à medida que a contração durante o processamento aumenta.

Ambas as pressões de injeção, responsável por pressionar o fundido para o interior da cavidade moldante, como a contrapressão, responsável pela compactação do material e compensação da perda de volume devido à contração volumétrica, têm uma janela de processamento muito alargada. As pressões de injeção estão compreendidas entre os 450 e 1550 bar. A pressão de compactação pode ser aplicada numa gama entre os 350 e os 1050 bar. Os valores de pressão estão sujeitos a afinação pelos técnicos de injeção, até que sejam encontrados valores ideais para cada processo, não se podendo apontar um valor como sendo o ótimo.

Após a injeção, em determinados casos, é necessário voltar a introduzir humidade no polímero. Este processo pode ser efetuado emergindo as peças em água. Desta forma é possível baixar a temperatura de transição vítrea dos 50 para os 0 °C, adquirindo as peças excelentes propriedades mecânicas à temperatura ambiente. A hidratação permite que peças rígidas e frágeis se tornem em peças tenazes e com elevada resistência ao impacto. Este

processo pode ser uma mais-valia no aumento das características mecânicas no entanto torna as peças dimensionalmente instáveis. A absorção de água faz geometria da peça aumentar de dimensões o que pode comprometer a sua aplicação em determinadas aplicações.

### 6.3. Poli-eter-eter-cetona (PEEK)

O Polieterecetonato é um polímero semi-cristalino que pertence ao grupo das policetonas aromáticas. Este polímero foi o segundo do grupo das policetonas a ser introduzido no mercado pela ICI em 1978, seguindo o Poliariletercetonato (PAEK) que tinha sido sintetizado pela DuPont em 1962.

Este polímero é caracterizado pela sua elevada resistência térmica, suportando em serviço contínuo temperaturas de 250 °C e até 400 °C em picos de serviço de curta duração (Budinski & Budinski, 2005).

A sua alta cristalinidade, até 48%, proporcionam-lhe excelentes propriedades mecânicas e químicas. Das propriedades mecânicas destacam-se a elevada rigidez e resistência mecânica, elevada tenacidade e excelente comportamento à fadiga. Tem também bastante a aplicação na indústria alimentar e farmacêutica devido à sua elevada resistência a produtos químicos, a condições ambientais extremas e a radiações. É bastante utilizado neste último tipo de indústrias devido à possibilidade de repetidas esterilizações sem perda de propriedades. Resistente a hidrólise até 280 °C, tem boas propriedades tribológicas e elétricas o que lhe permite a aplicação num grande leque de ramos da indústria.

Apesar de não ser auto extingüível, tem baixa combustibilidade mesmo na ausência de aditivos, e quando em combustão tem muito baixa taxa de libertação de fumos.

A sua formação química confere-lhe características únicas. A partilha de grupos de acetona provoca o aumento da temperatura de processamento devido ao aumento da temperatura de transição e à elevada temperatura de cristalização. Os grupos de éter conferem características que facilitam o seu processamento (Goodship, 2004).

#### 6.3.1. Propriedades

- Elevada resistência mecânica e rigidez constantes até aproximadamente aos 140 °C.
- Aplicação em operações continua até aos 250 °C e até aos 300 °C em picos.
- Elevada resistência à fluência.
- Elevada resistência ao desgaste até aos 250 °C.
- Ideal para aplicações de deslize em atrito dinâmico.
- Baixo coeficiente de expansão.
- Muito baixa absorção de humidade.
- Elevada resistência a químicos e a hidrólise até aos 280 °C
- Elevada resistência a tensões.
- Elevada resistência a radiações de grande intensidade.

- Necessita de aditivo para ser resistente a radiação UV.
- Não é inflamável.
- Liberta muito pouco fumo quando em combustão.
- Facilidade de maquinação.
- Permite esterilização.
- Elevada resistência a vapores.

As propriedades mecânicas do PEEK estão representadas no Quadro 6-4. Quadro 6-2– Propriedades técnicas das Poliamidas .O PEEK pertence ao grupo de polímeros de elevado desempenho e apresentam elevadas propriedades mecânicas sendo bastante utilizadas na substituição de materiais metálicos em muitas aplicações.

Quadro 6-4– Propriedades técnicas do PEEK (Ashby & Jonhson, 2002).

Propriedades Técnicas		
Módulo de elasticidade	<i>GPa</i>	3.76 a 3.95
Alongamento	%	30 a 150
Resistência à fratura	<i>MPa · m<sup>1/2</sup></i>	2.73 a 4.30
Densidade	<i>Mg/m<sup>3</sup></i>	1.3 a 1.32
Dureza	<i>Hv</i>	25 a 28
Tensão de Rotura	<i>MPa</i>	87 a 95
Temperatura de Serviço	<i>C</i>	- 30 a 250
Calor específico	<i>J/kg · K</i>	1443 a 1501
Condutividade térmica	<i>W/m · K</i>	0.24 a 0.26
Expansão térmica	<i>10<sup>-6</sup>/K</i>	72 a 194.4
Capacidade Energética	<i>MJ/kg</i>	305 a 326
Potencial de Reciclagem	Alto	
Aspeto	Opaco	

### 6.3.2.Principais aplicações

As aplicações típicas deste polímero estão associadas a tarefas onde são exigidas características muito específicas e de elevado rigor técnico. As aplicações mais comuns estão associadas a elevados esforços mecânicos, térmicos e elétricos.

Na indústria automóvel são produzidas rodas dentadas, cremalheiras e vedantes para várias partes do carro. A facilidade de produção de peças de elevado rigor, sem necessidade de operações posteriores, e com muito baixo peso, são a escolha ideal para incorporar na indústria automóvel, onde a aplicação de peças de baixa densidade se reflete diretamente no consumo de combustível.

Na indústria alimentar e farmacêutica tem bastante aplicação devido à elevada resistência a químicos e a vapor. Permite o contacto com alimentos sem perda de características, mesmo quando submetido a radiação, a produtos químicos e a gases.

Elevada resistência ao desgaste, flexibilidade de processamento, estabilidade dimensional, desgaseificação e absorção de humidade baixa e resistência a alta temperatura tornam o PEEK a escolha para muitas aplicações eletrónicas como componentes de telemóveis, placas de circuitos, sensores e colunas de som.

Têm também aplicação na indústria aeronáutica, onde além das características mecânicas, são necessárias características como resistência ao meio ambiente, gases e químicos, não sejam inflamáveis e libertem pouco fumo quando em combustão. A elevada resistência à fluência é uma das características exigidas em aplicações de aviação.

Na indústria em geral, têm ainda aplicações em bombas, turbinas, elementos em que exista elevado esforço mecânico e atrito dinâmico, rolamentos, chumaceiras e vedantes e também aplicações que envolvam gases e vapor a elevadas temperaturas.

Podem ter ainda aplicações na indústria têxtil, em tapeçaria e vestuário, em linhas de pesca e cordas.

### **6.3.3. Processamento por injeção**

O polímero PEEK tal como as PA necessita de ser submetido a secagem antes do processamento para retirar a humidade retida no interior do polímero. Este processo é efetuado em estufas, ou mesmo na tremonha, e deve permanecer num ambiente isolado a uma temperatura aproximadamente de 150 °C durante 3 a 4 horas. Tal como já foi referido para as PA a humidade prejudica tanto o processo de injeção como a qualidade final da peça.

A temperatura de plasticização, onde o granulado é transformado em fundido, deve ser efetuada com o interior do cilindro compreendido numa gama de temperaturas entre os 350 e os 420 °C. Para este polímero um teto máximo de processamento é considerado e que não deve ultrapassar os 440 °C pois corre o risco de queimar, e destruir o material plástico.

As superfícies moldantes tal como os canais de alimentação devem ser mantidos a uma temperatura entre os 150 e 180 °C. Desta forma, com a temperatura constante em todo o percurso do fluido, garante-se um escoamento uniforme e uma boa qualidade superficial da peça.

O material no estado tem baixo índice de viscosidade e elevada fluidez. Características que lhe conferem um fácil escoamento, o que elimina muitos defeitos associados a materiais com viscosidades elevadas.

As velocidades de injeção devem ser testadas durante o processo de forma a conseguir um valor ideal, no entanto é aconselhável utilizar velocidades de valor médio a alto, dependendo dos outros parâmetros. As pressões utilizadas tanto na injeção como na compactação devem ser testadas, no entanto valores iniciais devem ser considerados. A pressão inicial de injeção

deve estar compreendida entre os 800 a 1500 bar. A pressão de compactação, responsável por contrariar a perda de volume devido à contração volumétrica, deve estar compreendida entre os 450 e os 800 bar.

A contração volumétrica durante o processo de injeção, pode ser contrariada pela compactação. Para que este fenómeno aconteça, a maior parte da contração deve-se dar com a peça ainda dentro da cavidade moldante. Os valores típicos de contração são de 1% para PEEK sem cargas e de 0.1 a 0.4% para PEEK reforçado com cargas.

## **6.4. Tecidos Pré-impregnados**

Os pré-impregnados são produtos compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras. Neste trabalho vão ser apenas abordados os tecidos de matriz termoplástica, nomeadamente a PA12 e o PEEK por serem referenciados pela literatura como polímeros de elevado desempenho. O objetivo do uso destes compósitos é obter peças com elevadas características técnicas. A combinação das características técnicas dos polímeros atrás referidos com os reforços de fibras de elevado desempenho como as de carbono, vidro e aramida, permitem obter produtos que começam a ganhar mercado, principalmente pelas características técnicas e mecânicas que apresentam. Os produtos antes de processados são apresentados de diversas formas, como rolos de fios tecidos, entrelaçados, etc., sendo cada uma destas soluções indicadas para determinadas aplicações. O processamento destes compósitos, é feito principalmente por termo-formação o que limita a aplicação das peças.

A aplicação de matrizes termoplásticas nos compósitos de fibras longas contribui para uma melhoria muito significativa de algumas importantes características finais destes materiais. Como principais vantagens podem-se referir, nomeadamente, o aumento da tenacidade, tolerância ao dano e durabilidade e ainda a possibilidade de reprocessamento, reciclagem e significativa redução do ciclo de fabrico. A aplicação das matrizes termoplásticas comporta, no entanto, também alguns novos desafios tecnológicos e científicos que derivam, sobretudo, dos elevados níveis de temperatura e de pressão que o seu processamento exige (Silva , 2005).

### **6.4.1. Aplicações**

As elevadas características técnicas que estes produtos apresentam, tornam-nas ideais para aplicações onde se pretende combinar principalmente elevada resistência mecânica com baixo peso. Desde aplicações de desporto de alta competição a aeronáutica a sua aplicação tem surgido nas mais diversas aplicações. A sua utilização tem sido principalmente em mercados de topo devido principalmente ao elevado preço que apresentam, tanto pelo preço das matrizes como do das fibras. Na Figura 6-4 são apresentadas algumas das aplicações mais comuns deste tipo de produtos.

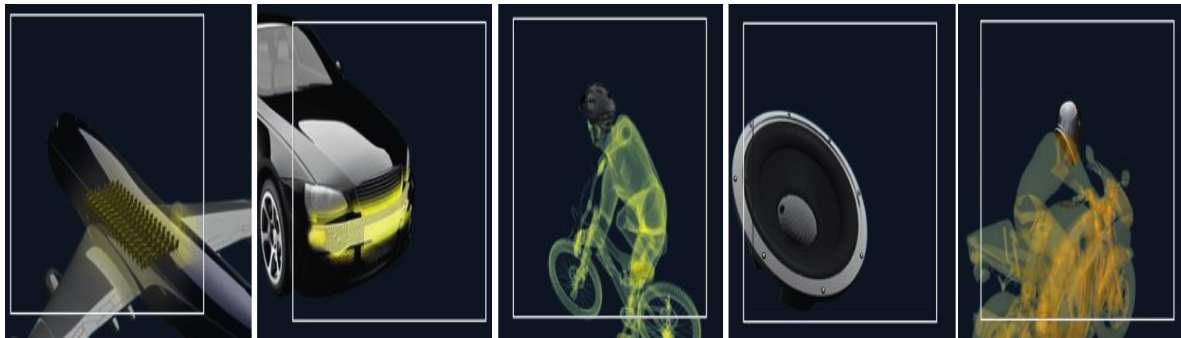


Figura 6-4 – Exemplos de aplicações dos tecidos pré impregnados. (Laminates, 2012)

### 6.4.2. Apresentação

Os pré-impregnados estão disponíveis em diversos formatos e cada um dos formatos apresentam características específicas que os torna ideais para determinadas aplicações. As características mecânicas também variam em cada um dos formatos. Apesar de no mercado existirem mais combinações de polímeros/fibras, neste trabalho apenas vão ser apresentadas as características dos materiais que se pretende utilizar, ou seja, PA e PEEK.

#### 6.4.1. Pré-impregnados em fio e tecidos unidirecionais

Os pré-impregnados em fio, são fornecidos em bobines. O fio para ser processado é desenrolado da bobine e enrolado novamente em volta de uma forma pré definida. O fio é utilizado principalmente para produzir peças de revolução, onde o fio é enrolado na forma da peça que irá formar.

Os tecidos unidirecionais (UD), são apresentados como fitas, onde as fibras são todas alinhadas na mesma direção. Esta orientação define a direção em que o tecido deve ser aplicado, pois são as fibras garantem às peças, muitas das características técnicas.

Na Figura 6-5-A estão representados as bobines de fio e na Figura 6-5-B está representado o tecido unidirecional.

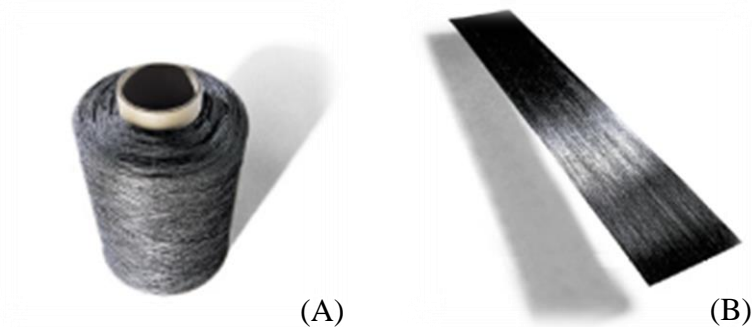


Figura 6-5 – Bobines de fio (A) e tecido unidirecional (B) (Shappe, 2012).

As propriedades mecânicas para estes dois produtos são as mesmas e estão representadas no Quadro 6-5.

Quadro 6-5– Propriedades mecânicas de fios e fitas UD (Shappe, 2012).

	Tração		Flexão	
	$\sigma$ [MPa]	$E$ [GPa]	$\sigma$ [MPa]	$E$ [GPa]
PA12 +Carbono	1400	98	1010	107
PEEK + Carbono	1850	123	1435	100

O Quadro 6-6 apresenta as propriedades de concentrações e pesos dos fios e das fitas feitas a partir de fios.

Quadro 6-6– Propriedades específicas dos fios (Shappe, 2012).

Fios	% em peso	% em volume	Peso g/m	Densidade
PA12 +Carbono	32/68	45/55	1.19	1.43
PA12 +Carbono	32/68	45/55	0.59	1.43
PA12 +Carbono	32/68	45/55	0.31	1.41
PA12 +Carbono	32/68	45/55	0.1	1.44
PEEK + Carbono	40/60	47/53	0.59	1.55
PEEK + Carbono	40/60	47/53	0.31	1.55

O Quadro 6-7 apresenta as propriedades de concentrações das fitas UD feitas a partir de fios.

Quadro 6-7– Propriedades das fitas unidirecionais produzidas a partir fios.

Tecidos UD	% em peso	% em volume	Peso g/m <sup>2</sup>	Densidade	Angulo entre fibras	Dimensão [mm]
PA12 +Carbono	32/68	45/55	900	1.43	0	150x0.63
PA12 +Carbono	40/60	47/53	900	1.55	0	150x0.58

#### 6.4.1. Pré-impregnados em tecido bidirecional (2D fabric)

Os pré-impregnados bidirecionais (2D fabric) são apresentados em rolos não consolidados e em chapas consolidadas (rígidas). A grande vantagem dos tecidos é que apresentam as propriedades conferidas pelas fibras em duas direções. A sua aplicação deve ser feita tendo em consideração a orientação das fibras, de modo a que estas sejam orientadas nas direções de maior solicitação. Na Figura 6-6 estão representados os tolos de tecido (A) e placas de tecido (B).

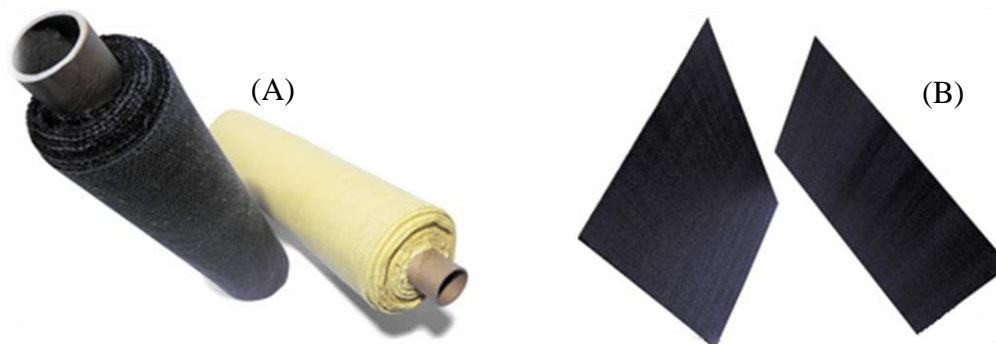


Figura 6-6 – Rolos de tecido (A) e placas de tecido (B) (Shappe, 2012).

As propriedades mecânicas dos tecidos apesar de serem fabricados nos mesmos materiais apresentam propriedades mecânicas distintas. As principais propriedades estão representadas no Quadro 6-8.

Quadro 6-8– Propriedades das fitas unidirecionais produzidas a partir fios.

	Tração		Flexão	
	$\sigma$ [MPa]	$E$ [GPa]	$\sigma$ [MPa]	$E$ [GPa]
PA12 +Carbono	800	61	600	52
PEEK + Carbono	1050	76	850	49

O Quadro 6-9 apresenta as propriedades de concentrações para os tecidos 2D não consolidados.

Quadro 6-9 – Propriedades dos tecidos 2D (Shappe, 2012).

Tecidos 2D	% em peso	% em volume	Peso [g/m <sup>2</sup> ]	Densidade	Angulo entre fibras	Dimensão [mm]
PA12 +Carbono	32/68	45/55	780	1.43	90	1270x0.55
PA12 +Carbono	36/64	50/50	780	1.40	90	1270x0.55
PA12 +Carbono	34/66	48/52	520	1.41	90	1270x0.37
PA12 +Carbono	34/66	48/52	390	1.41	90	1270x0.27
PA12 +Carbono	34/66	48/52	520	1.41	90	300x0.37
PEEK + Carbono	40/60	47/53	650	1.55	90	200x0.55
PEEK + Carbono	40/60	47/53	720	1.25	90	600x0.55

#### 6.4.1. Pré-impregnados em entrelaçado (*Braids*)

Os entrelaçados têm os fios orientados em várias direções o que lhes conferem propriedades em múltiplas direções. Têm a particularidade de se apresentarem como mangas e são

comercializados em rolos. Na Figura 6-7 estão representados um pormenor do entrelaçado (A) e os rolos de mangas de entrelaçado (B).



Figura 6-7 – Pormenor do entrelaçado (A) e Rolos de mangas de entrelaçado (B) (Shappe, 2012).

a  
manga espalmada. Esta solução pode ser utilizada com a manga espalmada, ou na forma de tubo. A propriedade ( $\nu$ ) representa a relação entre o comprimento e o diâmetro máximo. No Quadro 6-10 são apresentadas algumas propriedades de seleção dos entrelaçados.

Quadro 6-10 – Propriedades dos Entrelaçados (Shappe, 2012).

Entrelaçados	% em peso	% em volume	Peso g/m	Largura (espalmado) [mm]	Angulo entre fibras	$\nu$	Densidade
PA12 + Carbono	32/68	45/55	50	35	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	100	35	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	79	47	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	36/64	50/50	50	35	20	2.85	1.40
PA12 + Carbono	32/68	45/55	510	180	33	1.37	1.43
PA12 + Carbono	31/69	44/56	6.4	10	20	2.85	1.44
PA12 + Carbono	34/66	48/52	21.3	10	20	2.85	1.41
PA12 + Carbono	32/68	45/55	50	35	15	3.42	1.43
PA12 + Carbono	31/69	45/55	72	10	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	130	65	15	3.42	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	217	Ø25	20	-	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	150	35	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	200	110	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	86	60	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	30.3	22	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	30.3	18	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	100	30	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	50	32	20	2.85	1.37

PA12 + Carbono	32/68	45/55	25	26	20	2.85	1.43
PA12 + Carbono	32/68	45/55	270	157	25	2.85	1.43
PEEK + Carbono	40/60	47/53	55	35	35	1.15	1.55

**6.4.1. Tecidos Multi-direcionais**

Os tecidos multi-direcionais têm a orientação das fibras de reforço em mais que duas direções. Da mesma forma que as soluções anteriores, a sua características técnicas de resistência a esforços provêm da sua aplicação na mesma orientação que as solicitações. Na Figura 6-8 – Rolo de tecido multi-direcional (A) e Pormenor do tecido (B) .Figura 6-8 estão representados os rolos de tecido multi-direcional e um pormenor do tecido. A disposição do emaranhado das fibras torna as propriedades mecânicas do tecido homogêneas em todas as direções.

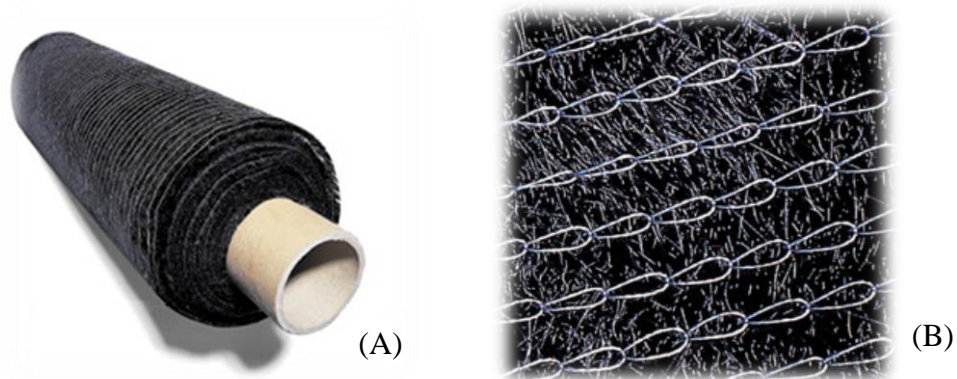


Figura 6-8 – Rolo de tecido multi-direcional (A) e Pormenor do tecido (B) (Shappe, 2012).

A sua apresentação é feita em rolos, como está representada na figura acima. Esta solução é a que apresenta resistência em mais direções o que a torna a solução mais completa. Esta multiplicidade de direções é obtida pela sobreposição de várias camadas de tecido, cada uma com a sua direção predominante. Os tecidos produzidos com fios têm as suas propriedades no sentido dos mesmos (Shappe, 2012), e estas são apresentadas no Quadro 6-11.

Quadro 6-11 Propriedades dos tecidos multi-direcionais produzidos a partir de fios (Shappe, 2012).

Tecidos	% em peso	% em volume	Peso g/m <sup>2</sup>	Densidade	Angulo entre camadas	Dimensão [mm]
PA12 + Carbono	32/68	45/55	1685	1.43	-30 +90 +30	1460x1.20
PA12 + Carbono	34/66	48/52	790	1.41	-30 +90 +30	1460x0.55

Os tecidos produzidos com as fibras soltas, apresentados no Quadro 6-12, perdem em propriedades como resistência em direções específicas, no entanto, consegue-se obter peças isotrópicas com as mesmas propriedades em todas as direções.

Quadro 6-12 Propriedades dos tecidos multi-direcionais produzidos a partir de fibras soltas (Shappe, 2012).

Tecidos	% em peso	% em volume	Peso g/m <sup>2</sup>	Densidade	Angulo entre camadas	Dimensão [mm]
PA12 + Carbono	31/69	44/56	520	1.44	-45 +45	1500x0.35
PA12 + Carbono	31/69	44/56	780	1.44	-30 +90 +30	1500x0.55

### 6.4.1. Condições de Processamento

O processo de moldação deve ser efetuado dentro de condições ótimas, de forma a obter peças uniformes e de elevada qualidade. Os parâmetros de controlo do processo são fundamentalmente o tempo de impregnação, isto é, o tempo necessário para que o material polimérico atinja a temperatura de processamento e impregne as fibras na totalidade. O tempo de impregnação, está dependente da combinação entre temperatura e pressão. A Figura 6-9 mostra as combinações de processamento para a PA 12.

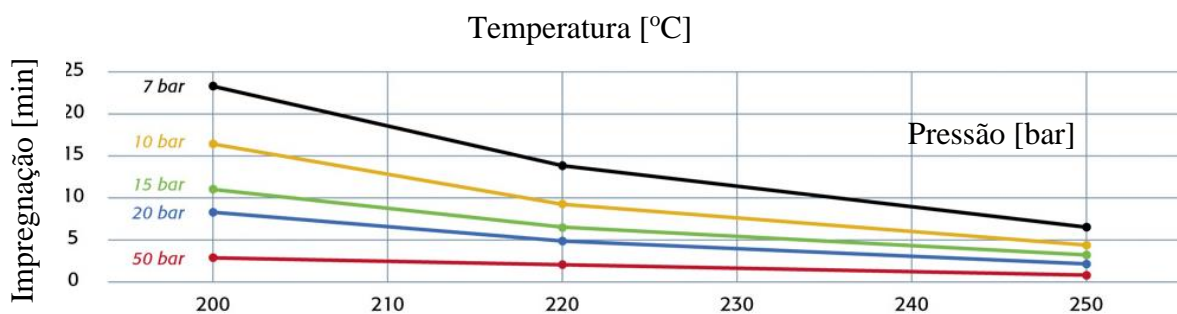


Figura 6-9 - Condições de processamento para PA12 (Shappe, 2012).

Em modos gerais pela figura pode-se verificar que o tempo de impregnação é tanto mais baixo quanto mais alta for a pressão e a temperatura de processamento. Para temperaturas compreendidas entre os 220 e os 250 °C o tempo de impregnação e a pressão de processamento têm menos variação do que para temperaturas mais baixas. A Figura 6-10 mostra a combinação de parâmetros para o processamento do PEEK.

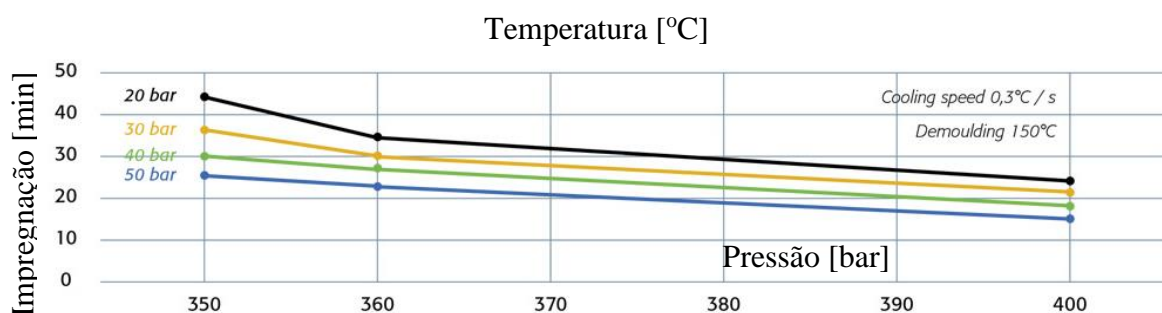


Figura 6-10 - Condições de processamento para PEEK (Shappe, 2012).

Pode-se observar que os tempos de impregnação são superiores para o PEEK em comparação com a PA12 para a mesma pressão. A gama de temperaturas de processamento é também bastante superior para o PEEK, no entanto apresenta de igual forma, uma demarcação a partir dos 360 °C em que as condições de processamento são caracterizadas por um novo comportamento. O PEEK tem maior período de impregnação, são processadas a temperaturas e a pressões mais elevadas que a PA 12.

## 7. INJEÇÃO MULTI-MATERIAL

O próximo capítulo pretende demonstrar as vantagens da injeção multi-material. O conceito de obter peças constituídas em diversos materiais, confere à peça final, um maior leque de utilização, pois cada secção formada por um material diferente, tem atribuída uma funcionalidade distinta. A moldação por injeção é atualmente a tecnologia de processamento de polímeros com maior importância a nível comercial pois permite obter peças com alto rigor dimensional a elevadas taxas de produção. A tecnologia tem a capacidade de utilizar uma grande diversidade de polímeros, o que permite a utilização dos plásticos como substituição de materiais como a madeira, o vidro ou metais, em diversas aplicações (Love & Goodship, 2002). A necessidade de peças com múltiplas funções, compostas por partes em diversos materiais, levou à evolução dos sistemas de injeção de forma a dar resposta às necessidades. O método convencional obriga a moldações independentes que são posteriormente montadas formando a peça final o que comporta elevados custos em mão de obra e operações adicionais. Com a utilização de tecnologias de injeção multi-material conseguem-se peças compostas por várias materiais sem a necessidade de operações de montagem, o que aumenta a velocidade de produção e a qualidade final da peça.

### 7.1. Injeção Com Sistemas Valvulados

Os sistemas de injeção controlados por válvulas (*Valve Gate*), são bastante utilizados devido tanto às vantagens económicas como na redução do tempo de ciclo e na redução do material desperdiçado, como nas vantagens tecnológicas que proporcionam. O desenvolvimento dos sistemas valvulados permitiu a evolução de tecnologias como a co-injecção e a injeção sobre tecido. Peças mais robustas e com menos defeitos tanto visuais como estruturais são obtidas através do controle do fluxo de material. Várias outras características e vantagens são conseguidas pela aplicação desta tecnologia que serão apresentadas neste trabalho. Sistemas com múltiplos pontos de injeção, permitem injetar diversos materiais no mesmo ciclo.

#### 7.1.1. Acionamento e Controlo do fluxo

O controlo dos pinos que permitem a passagem do material fundido pode ser feito por acionamento hidráulico ou pneumático, estando esta escolha dependente das características da máquina injetora, das condições do serviço, do peso da peça plástica, do tipo de indústria a que se destina a peça plástica, entre outras (Centimfe, 2003). Apesar do fluido utilizado ser diferente, o princípio tecnológico é o mesmo, a válvula obriga o pino a avançar ou recuar permitindo ou não o fluxo de material. O acionamento pneumático tem mais aplicação na produção de peças com fins médicos ou alimentares, em que a limpeza do produto final é imperativa. Este tipo de acionamento é mais lento que o hidráulico, o que não permite um controlo tão rigoroso, principalmente quando são necessárias pressões de injeção mais

elevadas. O controlo hidráulico é mais rápido e preciso e tem aplicação em todas as outras áreas em que a limpeza não seja uma condição essencial. Este sistema é o mais utilizado na produção de peças para automóveis. O uso dos sistemas valvulados permite o controlo da pressão e do fluxo de material tanto no interior dos canais de injeção como na cavidade moldante, quando se trata de injeção direta. Dependendo da aplicação e da zona da peça a injetar, pode surgir a necessidade de controlar a quantidade de material ou a pressão a que a injeção está a ser feita, de forma a obter peças de melhor qualidade (Gonçalves, 2012).

#### **7.1.2.Redução do desperdício de material**

A redução do material injetado é significativa, pois apenas é injetada a quantidade estritamente necessária. O material dos canais de injeção e gitos permanecem dentro de carburadores, que mantêm o material fundido à temperatura de processamento, desde o bico da máquina de injeção até á cavidade moldante. O material dentro dos carburadores permanece preparado dentro do molde, durante as restantes fases do processo de injeção, até recomeço de um novo ciclo, onde vai ser o primeiro material a ser injetado para dentro da cavidade.

#### **7.1.3.Redução do tempo de ciclo**

Durante a fase de arrefecimento a peça plástica sofre contração volumétrica. Para que a peça final tenha a forma e o aspeto desejado, a contração é compensada pela aplicação de uma contra pressão, também designada de segunda pressão. A segunda pressão é também responsável por evitar o refluxo do material para o bico. O uso de sistemas valvulados permite que se feche o ponto de injeção, e desta forma elimina-se o refluxo de material, diminuindo o tempo necessário para efetuar a segunda pressão.

A possibilidade de manter o material fundido à temperatura de processamento dentro do sistema de injeção até à zona moldante, permite a entrada imediata de material para dentro da cavidade assim que a máquina começa a injetar, eliminando o tempo de escoamento dentro dos canais de alimentação.

#### **7.1.4.Injeção a baixa pressão**

A possibilidade de controlar individualmente cada bico de forma imediata permite a injeção localizada de material. Desta forma, a pressão aplicada sobre a cavidade depende do número de injetores que estiverem abertos. Assim, a escolha da máquina de injeção, responsável por suportar a força pressão de injeção, pode recair por um modelo com mais baixa tonelagem que é significativamente menos onerosa. Este controlo individual dos injetores permite também injetar moldes família a pressões baixas em máquinas de baixa tonelagem, em que a área total de enchimento é normalmente grande e implicava o uso de máquinas de injeção de grandes dimensões. Em moldes família normalmente surgem peças com diferentes dimensões,

e diferente complexidade de geometrias, desta forma é possível, injetar cada peça individualmente, cada uma com a pressão ideal. Se a mesma pressão fosse utilizada para todas as peças, as peças mais pequenas ou menos complexas ficariam sobre compactadas o que as tornaria frágeis ou poderiam apresentar deficiências na qualidade superficial. A injeção com sistemas valvulados a baixa pressão permite obter peças decorativas de melhor qualidade. A injeção sobre tecido efetuada a baixa pressão, permite obter peças com melhor qualidade, pois permite um melhor controlo do processo.

#### **7.1.5. Qualidade das peças injetadas**

A qualidade das peças obtidas por injeção pode ser avaliada de diversas formas dependendo da aplicação a que se destinam. No entanto, duas características principais destacam-se na generalidade das peças, o aspeto superficial e a robustez estrutural. Na injeção convencional, seja qual for a forma de ataque à peça, vão existir marcas no ponto de injeção que poderão ser indesejáveis. Os sistemas valvulados, permitem obter peças, em que a injeção é feita de forma direta, e sem marca de injeção. As linhas de soldadura, causadas pelo encontro das frentes de fluxo do material, originam zonas frágeis da peça. O controlo dos pontos de injeção, em termos de quantidade de material e de tempo que cada bico está aberto, permite controlar a posição das linhas de soldadura. Estas linhas de junção, podem ser deslocadas para zonas da peça, em que esta não esteja sujeita a esforços. Em peças injetadas com materiais amorfos, as linhas de soldadura podem ser mesmo visíveis o que inutilizaria a peça. Peças em que seja necessário proceder a operações de acabamento de pintura, nas linhas de soldadura, ou zonas em que haja arrastamento de material devido a altas pressões de injeção, a superfície pintada fica danificada.

#### **7.2. Injeção Sequencial**

A injeção sequencial é uma técnica proveniente da tecnologia de injeção com sistemas valvulados que tira vantagem de todas as suas potencialidades. Principalmente devido à indústria automóvel, é exigido das peças plásticas melhores características mecânicas em conjunto com geométricas complexas. Este tipo de peças tende a criar dificuldades durante a injeção devido à necessidade de elevadas pressões de injeção, o que pode resultar em peças muito rígidas e frágeis, a que as peças empenem durante o arrefecimento e à necessidade de utilizar máquinas com maior tonelagem. O sistema sequencial de injeção permite que apenas os bicos selecionados estejam abertos, injetando apenas em zonas estratégicas anulando as dificuldades atrás referidas. Em conjunto com os requisitos técnicos surgem os requisitos estéticos, destas peças é exigida elevada qualidade superficial, ou que sejam revestidas por película. Em peças injetadas a elevada pressão, é comum surgirem marcas durante a pintura (Knights, 2003). Em peças injetadas com polímeros amorfos, por exemplo o Polistireno ou o Policarbonato, em que a peça final é transparente, as linhas de soldadura podem ficar visíveis. Abrindo e fechando os bicos sequencialmente, consegue-se controlar as linhas de soldadura

para zonas não visíveis, ou zonas em que não sejam problemáticas. Injeção em multi-ponto, sobre película, executada em simultâneo em que não se consegue controlar o fluxo do material pode levar a película a dobrar ou enrugar nas zonas de encontro das frentes. Com o sistema sequencial os bicos podem ser abertos e fechados para que as rugas do material estejam sempre à frente do fluxo e possam ser levadas para zonas não visíveis da peça. Um sistema de válvulas convencional, apenas abre e fecha as válvulas todas em simultâneo, sendo difícil controlar linhas de soldadura, ou as zonas em que é necessário aplicar diferenciais de pressão, ou fazer o balanceamento do fluxo, etc. Com um sistema sequencial em que o controle é individual em cada bico, todos os problemas enumerados atrás podem ser minimizados ou mesmo anulados. A disposição dos bicos de injeção depende da configuração da peça a injetar mas neste caso vai ser ilustrado um caso de um alinhamento linear. A Figura 7-1 representa o avanço de fluxo num sistema de injeção linear.

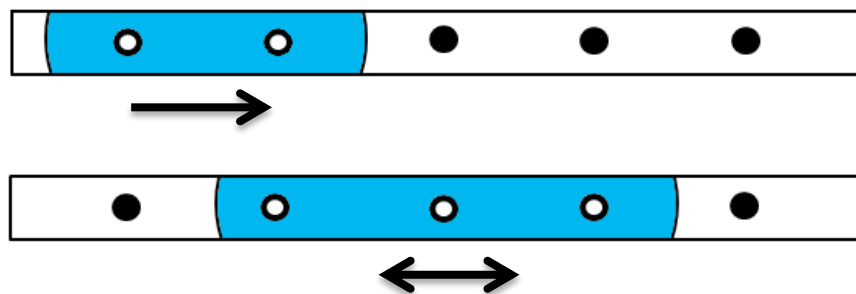


Figura 7-1 Avanço da frente de fluxo (Goodship, 2004).

Na Figura 7-2 está representada uma configuração possível de um sistema sequencial, onde se podem observar dois bicos de injeção aplicados a uma cavidade (Figura 7-2-A). A injeção começa quando um dos bicos é aberto, permanecendo os outros bicos fechados, permitindo ao material avançar no interior da cavidade (Figura 7-2-B). A abertura dos restantes bicos é feita de forma sucessiva dependendo do avanço da frente de fluxo de material, ou seja, quando a frente do material avança sobre cada bico estes são abertos (Figura 7-2-C). Os bicos podem ser acionados por tempo, pela posição do fuso ou por um sensor de pressão acionado pelo próprio material injetado. São utilizados também sensores para localizar a posição do pino de cada bico, ou seja, para informar se a válvula está aberta ou fechada. Desta forma, a pressão de injeção recai sobre o último bico aberto, ficando este responsável pelo avanço da frente de fluxo. Com o uso da injeção sequencial conseguem-se fluxos mais reduzidos (distancia entre cada bico) e assim não existe perda de pressão na frente de avanço do material. As linhas de soldadura são totalmente anuladas por esta tecnologia tornando-a ideal para determinadas aplicações como a injeção de peças muito compridas, onde as linhas de soldadura poderiam originar zonas estruturalmente mais frágeis. Pelas características descritas atrás, esta tecnologia é ideal para fazer injeção sobre películas, sejam estas de filme ou de tecido. Atualmente este tipo de injeção é utilizado sobretudo com propósitos estéticos e decorativos, portanto é vital que as peças finais não apresentem defeitos, como bolhas de ar, ou rugas. A Injeção sequencial permite que a película seja calcada pelo avanço do material garantido que fica totalmente esticada e sem defeitos. O avanço do material pode ser feito com várias

técnicas, estando esta escolha dependente da forma da peça a injetar. Peças longas permitem o alinhamento linear dos bicos, e a sua abertura pode ser executada para que o avanço do material seja feito de um lado para outro da peça. Ou então, que o primeiro bico a abrir seja o central e o avanço da frente de material se faça do centro para as extremidades da peça. A Figura 7-1 representa os dois métodos enunciados atrás. Em peças com geometrias mais complexas, em que a disposição dos bicos não seja linear, a abertura dos bicos deve ser testada de forma a otimizar o processo para que a peça final tenha a melhor qualidade possível e o ciclo demore o menos tempo possível.

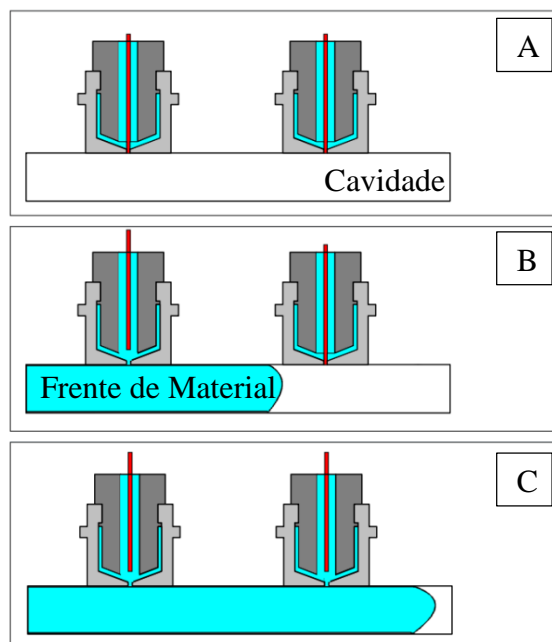


Figura 7-2 Representação de sistema sequencial de injeção (Goodship, 2004).

### 7.3. Injeção Multi-material

Existem principalmente dois métodos mais comuns de injeção multi-material. O primeiro designado de Co-Injeção, ou Injeção Combinada, é o método mais utilizado como forma de obter peças com determinadas características estruturais. Um dos materiais confere à peça as características técnicas, normalmente o material que se encontra no núcleo, e um segundo material que se sobrepõe ao primeiro, forma uma camada exterior e confere à peça as características estéticas. Este método também pode ser utilizado de forma a baixar o custo por peça, utilizando um material de mais baixo custo no núcleo não visível e um material com melhores características na camada exterior. Neste segundo método os dois materiais são injetados em simultâneo obtendo-se uma estrutura tipo “sandwich”.

No segundo método o segundo material é moldado sobre uma parte da peça moldada previamente, ou sobre tecido, película, etc, em que a peça final apresenta os dois materiais

bem definidos. Este método tem principalmente finalidades de decoração, ou seja, a principal intenção dos vários materiais é a apresentação e motivação estética. Esta técnica obriga sempre que a peça seja conseguida em mais que uma etapa, ao contrário do método anterior. As duas etapas do processo podem ser conseguidas por dois métodos, um em que a peça é transferida entre duas máquinas e um outro em que se utiliza a mesma máquina com várias unidades de injeção. Apesar não existir um número limite de materiais diferentes que se possam injetar na mesma peça, estando este número obrigatoriamente ligado a um custo mais elevado e a um recurso muito mais alargado de equipamentos e tecnologias, usualmente as peças apresentam apenas dois materiais diferentes. Da mesma forma, quando o material é o mesmo mas se pretendam zonas de cores diferentes por exemplo, o que obriga ao uso da mesma tecnologia, mudando apenas o pigmento para obter a cor pretendida.

#### 7.4.Co-Injeção

A co-injeção (CI) é uma tecnologia de injeção capaz de moldar diferentes materiais para formar uma única peça. A necessidade de obter peças com diversos materiais pode surgir das características técnicas que cada um dos materiais acrescenta ao produto, pode ser de natureza estética, como uma forma de cativar o comprador a adquirir determinado produto, estratégia de marketing, demarcação perante a concorrência, etc. A técnica é mais dispendiosa que a injeção normal, no entanto conseguem-se peças com características únicas que lhe dão valor e as tornam rentáveis de produzir, sejam essas características estéticas ou técnicas. Na Figura 7-3 pode-se observar uma representação esquemática de uma peça injetada por co-injeção onde apenas é visível a camada exterior.

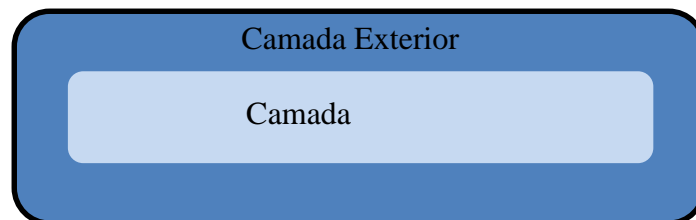


Figura 7-3 – Representação da estrutura Sandwich obtida por co-injeção.

A Co-injeção é utilizada principalmente em peças com funções estruturais. É comum a sua utilização em peças em que se pretenda uma diminuição do peso, onde a camada interior é injetada com um material de baixa densidade como por exemplo espuma. Esta tecnologia é também utilizada quando se pretende diminuir o preço por peça. Utilizando para a segunda camada o material com melhores características, injetando no núcleo um material mais económico, muitas das vezes com material reciclado.

O processo efetua-se por três etapas que estão representadas na Figura 7-4. Na etapa A o processo inicia-se por injetar uma determinada quantidade do material exterior, sendo esta quantidade obtida por experimentação, ou por experiência prévia. Na etapa B o material do

núcleo é injetado forçando o avanço do material exterior e pressionando-o contra as paredes do molde.

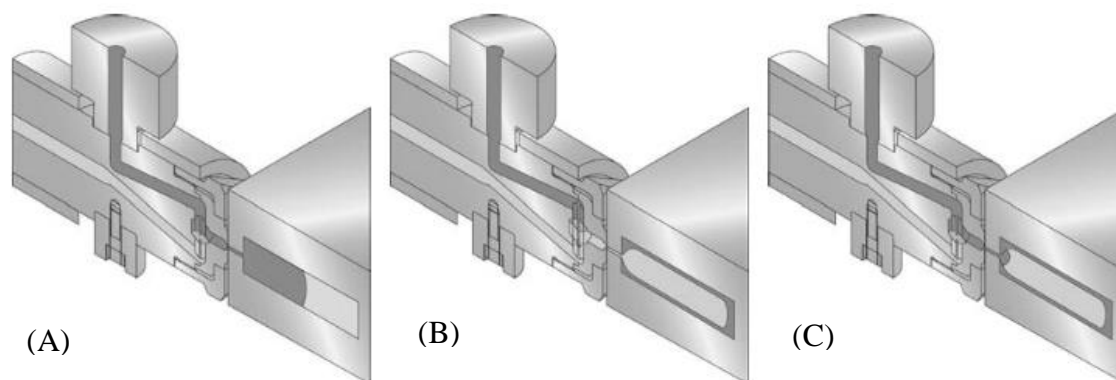


Figura 7-4 – Representação da estrutura Sandwich obtida por co-injeção.

Na etapa C é novamente injetado o material exterior. Esta última etapa forma uma capa que esconde o material do núcleo e tem também a finalidade de limpar o bico de injeção do material do núcleo, de forma a dar início a um novo ciclo de injeção (Centimfe, 2003).

Sempre que surge a necessidade de peças com vários materiais, a seleção e combinação destes é determinada pela aplicação a que se destina. Por outro lado, a forma de produzir a mesma peça, pode seguir vários rumos, dependendo da experiência ou do conhecimento de quem está a produzir a ferramenta. Desta forma, como cada peça e ferramenta são únicas para cada aplicação, não existe um método singular que se possa garantir que seja a melhor forma de obter o que se pretende. A mesma tecnologia por ter sucesso para um par de materiais não garante ser sucesso para uma combinação de materiais diferentes. Cada ferramenta e combinação de materiais devem ser analisadas de forma independente.

### 7.5. Injeção sobre película “Overmolding”

A injeção sobre película, em qualquer das técnicas existentes, tem hoje um importante papel na indústria dos moldes pois apresenta vantagens económicas significativas sobre outro tipo de processos em que se pretendam peças plásticas com decoração. O principal objetivo atualmente pretendido na injeção sobre filme é a decoração das peças, com filmes ou tecidos que podem apresentar cores, padrões, texturas, etc., com informações ou mesmo a marca dos produtos. Outros tipos de decoração como texturização das cavidades obrigam a dispendiosas operações secundárias, a peça a moldar tem de respeitar determinadas regras para que a textura possa ser aplicada e apenas permite decorações em termos de forma. Os sistemas de válvulas, sequenciais ou não, e todas as vantagens descritas anteriormente são aplicados de forma direta nesta tecnologia. A película na qual se está a fazer injeção, deve ter um ponto de fusão superior ao ponto de fusão do material que está a ser injetado, para que esta não seja

danificada. Na Figura 7-5 estão representadas peças plásticas de polímero injetado sobre película representativa de madeira (Summerer, 2009).



Figura 7-5 – Injeção sobre filme representativo de madeira (Summerer, 2009).

#### **7.5.1. Vantagens da injeção sobre película**

Este processo apresenta diversas vantagens económicas e funcionais, das quais se destacam a redução de operações secundárias e mão-de-obra, onde a produção da peça e aplicação da película podem ser executadas em uma única operação. Pois, o processo pode ser totalmente automatizado e a peça sai pronta da máquina de injeção sem que sejam necessárias operações secundárias. Não necessita do uso de colas, pois a adesão entre a película e o material plástico é promovida pelo material fundido que adere normalmente à película apenas pela aplicação da pressão interna existente dentro do molde. A qualidade das peças é superior pois a injeção é feita por sistemas adequados, sequenciais ou não dependendo da aplicação, que não só promovem a adesão das materiais mas também ajudam a colocar o filme na posição correta. Facilidade na troca da película quando assim se desejar, pois não é necessária intervenção no molde, ou seja, a peça plástica permanece a mesma, apenas é necessário trocar a película. Quando as peças apenas têm função decorativa e é usada uma tecnologia de injeção que origina linhas de soldadura, a película serve de capa e cobre as linhas de soldadura da peça final.

#### **7.5.2. Injeção sobre filme (*In Mold Decoration-IMD*)**

A injeção sobre filme deve ser executada sempre que possível em processo contínuo e automatizado de forma a reduzir o tempo de ciclo. O princípio da tecnologia é fazer passar o filme por entre as duas partes abertas do molde, o molde fecha, e de seguida a matéria plástica é injetada sobre o filme. Após o arrefecimento faz-se o corte do filme do rolo e por fim extrai-se a peça com o filme decorativo. O abastecimento do filme deve ser feito através de rolo para ser de mais fácil automatização. Quando se trata de pedaços mais pequenos de filme que são

colocados em pontos específicos do molde deve-se recorrer a outro mecanismo, como por exemplo um braço mecânico, que é também bastante eficaz a efetuar o procedimento, de forma a manter o ciclo de moldação o mais rápido possível.

A Figura 7-6 representa um molde com o sistema de abastecimento do filme por rolo.

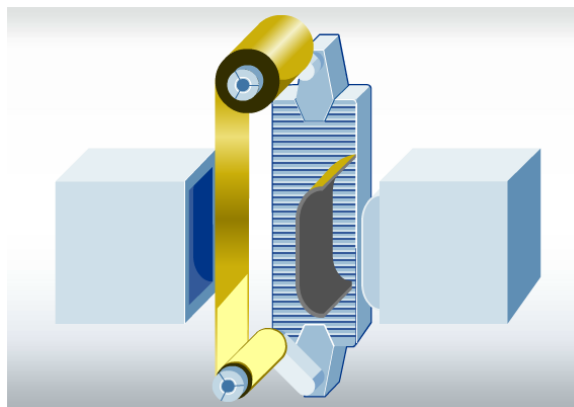


Figura 7-6 – Injeção sobre filme com abastecimento por rolo (Kurtz, 2012)

### 7.5.3. Injeção sobre filme postiço (*Film Insert Molding - FIM*)

Esta tecnologia destaca-se da injeção sobre filme normal, porque neste caso o filme faz parte da peça, ou seja, o filme não tem função meramente decorativa. Um dos requisitos do filme utilizado nesta tecnologia é ser mais espesso e mais rígido de forma a obter características que lhe permitem suportar maiores esforços, e aproximar-se das características da parte da peça que é injetada. Neste caso o filme é entendido como um postiço da peça, fazendo parte da sua estrutura e não sendo apenas utilizado como elemento decorativo. O filme pode passar por um processo prévio de pré formação e corte dos excessos, e depois é colocado dentro do molde. A pré-formação do filme pode originar uma geometria tridimensional, mais ou menos complexa ou simplesmente plana. A matéria plástica injetada pode sobrepor todo o filme ou apenas parte deste. Tal como a injeção sobre filme convencional, o processo deve ser o mais automatizado possível para reduzir tempos de operação (Bayer, 2012).

### 7.5.4. Injeção sobre filme elastómero

Esta técnica (*Olefinic thermoplastic elastomer film - TPO*) é utilizada para injetar material plástico sobre elastómero. Tem maior aplicação no mercado automóvel e é utilizada principalmente para injetar sobre película que imita pele. De forma a proporcionar maior conforto, o interior dos automóveis é muitas vezes revestido com este tipo de elastómero. Esta tecnologia tem particular interesse na película que consegue imitar qualquer tipo de pele, muito utilizada em carros desportivos de elevado custo, e que pretende proporcionar ao utilizador um conforto extra. A tecnologia de injeção é a mesma que para qualquer outro tipo de filme, mas com o especial cuidado da pressão de injeção. Como a pele tem relevo, a

pressão de injeção tem de ser baixa de forma a não esmagar o relevo e danificar as características que o elastómero pretende imitar. A Figura 7-7 apresenta uma peça obtida da sobre moldação de polímero sobre um elastómero.



Figura 7-7 – Injeção sobre elastómero (Müller, 2012).

Como normalmente as peças revestidas são de grande dimensão, como as forras das portas por exemplo, é aconselhado a utilização de sistemas valvulados sequenciais, pelos inúmeros motivos que esta tecnologia apresenta, mas principalmente pois permitem que a película fica bem aplicada e sem vincos.

#### 7.5.5. Injeção sobre Tecido

A injeção sobre tecido é utilizada em diversas indústrias, tendo a sua principal aplicação na indústria automóvel. Tal como a injeção sobre elastómero, a injeção sobre tecido é muito utilizada na decoração do interior dos automóveis. O tecido por ter uma espessura significativa, implica algumas considerações na construção do molde, principalmente nas superfícies de junta, pois o tecido fica preso entre estas superfícies. O processo de injeção sobre tecido implica as etapas representadas na Figura 7-8.

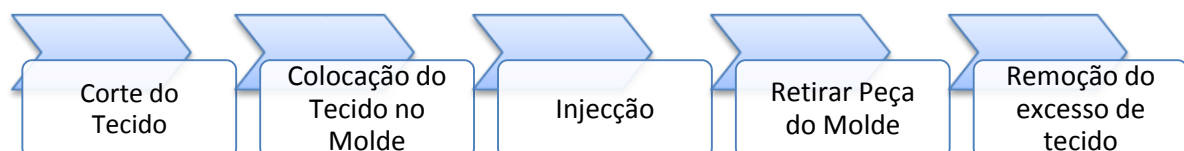


Figura 7-8- Etapas da injeção sobre tecido.

No processo comum, o tecido é cortado previamente, com uma configuração próxima da peça plástica final. Desta forma, o molde pode ser preparado para receber o tecido, o que implica mecanismos de prisão em determinadas zonas, e existe menos desperdício de material têxtil. O corte pode ser manual, mas preferencialmente é automatizado, diminuindo o ciclo total do

processo. Depois de cortado o tecido, este é colocado no molde onde é preso, normalmente por espigões que trespassam o tecido segurando-o. Na Figura 7-9 está representada a operação onde o tecido é introduzido no molde por um automático.

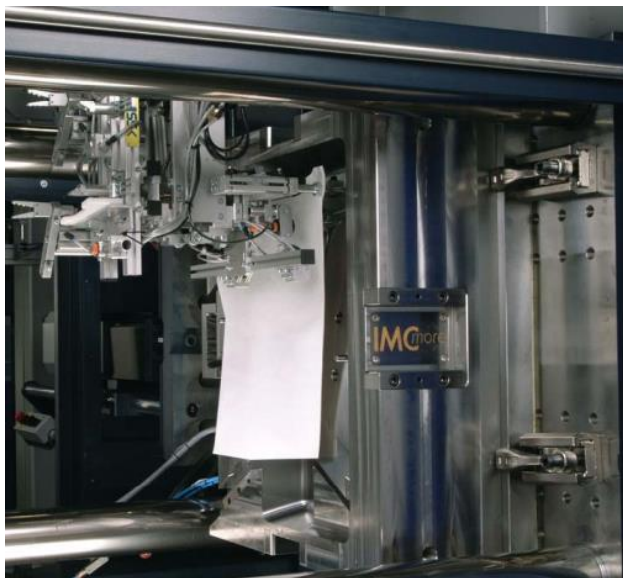


Figura 7-9- Colocação de tecido em máquina de Injeção (Summerer, 2009).

O molde é depois fechado e é efetuada a injeção sobre o tecido. A injeção sobre tecido deve ser sempre efetuada por um sistema valvulado sequencial devido à qualidade da peça final, e as vantagens já referidas que estes sistemas apresentam. Outras considerações deverão ser tomadas no momento da injeção, por exemplo a velocidade e a pressão de injeção são dois dos parâmetros intrínsecos e o controlo de um tem implicações significativas no outro. A entrada do primeiro material na cavidade deve ser feita a velocidades baixas para que este não desloque, dobre ou enrugue o tecido. No entanto esta velocidade não deve ser inferior a um limite mínimo, pois, e dependendo do material a processar, abaixo de uma determinada velocidade o escoamento tem muito tempo para arrefecer aumento a sua viscosidade. Para que seja injetado o material mais viscoso é necessário pressões de injeção superiores o que também pode danificar o tecido e o aspeto da peça final. Desta forma, é necessário testar os parâmetros até se chegar a uma combinação ideal. O aperfeiçoamento dos parâmetros deve ser baseado no conhecimento prévio para uma aproximação inicial, no entanto para cada combinação de materiais, polímero e tecido, poderão surgir novos valores que devem ser testados para o início de processo. A adesão entre o plástico e o tecido é promovida pela temperatura a que a matéria injetada se encontra. Um dos requisitos desta técnica é que o tecido suporte a temperatura de processamento do polímero injetado. Após o arrefecimento da peça, esta é extraída do molde, e procede-se ao corte do excesso do tecido. Esta operação é normalmente efetuada após a extração da peça, no entanto já existe no mercado marcas

comerciais com soluções para que o corte do tecido seja efetuado no interior do molde, e a peça extraída esteja no seu estado final (Tim , Turng, & Gramann, 2008).

A Figura 7-10 representa uma cadeira obtida por overmoulding de polímero sobre tecido têxtil.



Figura 7-10- Peça obtida por Injeção sobre Tecido (Love & Goodship, 2002).

### **7.6. Seleção de Materiais**

Um dos pontos importantes na utilização de tecnologias multi-material é a seleção de materiais utilizados. Alguns fatores de análise na seleção de materiais são a compatibilidade química, a viscosidade e a contração. A afinidade entre os dois materiais moldados é de extrema importância pois é pretendido que os dois materiais moldados fiquem unidos uniformemente como se apenas de um material se tratasse. É sabido que alguns materiais aderem facilmente, outros têm uma aderência limitada que pode ser utilizada para determinadas aplicações e outros materiais são incompatíveis e não aderem. Poderão também surgir problemas de miscibilidade na interface dos dois materiais que resultam em defeitos não só estéticos como estruturais (Goodship, 2004). Na necessidade de injetar materiais não compatíveis, mas que a incompatibilidade seja apenas relacionada com a adesão, podem ser utilizadas soluções de encaixe para unir os materiais ainda que o resultado final não seja tão eficiente. Para uma análise generalista da compatibilidade existem tabelas para os materiais mais comuns em injeção. É aconselhável quando se pretende uma análise mais determinista, uma consulta detalhada das fichas técnicas dos materiais pois as características podem variar conforme o fornecedor. Na Figura 7-11 estão referenciados os materiais mais comuns em injeção e a compatibilidade existente entre eles.

**Table 10.1 Material compatibility table**

	ABS	ASA	EVA	PA 6	PA 66	PBT	PC	HDPE	LDPE	PET	PMMA	POM	PP	PPO mod	PS-GP	PS-HI	SAN	TPU
ABS	+	+	+			+	+	-	-	+	+	-	-	-	*	*	+	+
ASA	+	+	+			+	+	-	-	+	+	-	-	-	*	-	+	+
EVA	+	+	+					+	+				+		+	+	+	
PA 6				+	+	*	*	*	*			-	*	-	-	-	+	+
PA 66				+	+	*	*	*	*			-	-	-	-	-	+	+
PBT	+	+		*	*	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+
PC	+	+		*	*	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+
HDPE	-	-	+	*	*	-	-	+	+	-	*	*	-	-	-	-	-	-
LDPE	-	-	+	*	*	-	-	+	+	-	*	*	+	-	*	-	-	-
PET	+	+				+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-		+
PMMA	+	+				-		*	*	-	+		*	-	-	-	+	
POM	-	-		-	-	-	-	*	*	-		+	-	-	-	-	-	
PP	-	-	+	*	-	-	-	-	+		*	-	+	-	-	-	-	-
PPO mod	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	*	-
PS-GP	*	*	+	-	-	-	-	-	*	-	-	-	-	+	+	+	-	-
PS-HI	*	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-
SAN	+	+	+	+	+	+	+	-	-		+	-	-	*	-	-	+	+
TPU	+	+		+	+	+	+	-	-	+			-	-	-	-	+	+

Key (-) : No adhesion, (\*) : Poor adhesion, (+) : Good adhesion  
 PS-GP = general purpose polystyrene  
 PS-HI = high impact polystyrene

Figura 7-11- Tabela de Compatibilidade de Materiais (Goodship, 2004).

É entendido pela análise da Figura 7-11 que a adesão é favorável em polímeros da mesma espécie. Desta forma, é justificada a escolha para injeção sobre o tecido pré-impregnado, do mesmo polímero existente no tecido. Outro dos parâmetros a analisar na seleção é a viscosidade dos materiais. Deve ser feita uma análise das características reológicas dos dois materiais para prever o comportamento do escoamento de um material sobre o outro. Em co-injeção o material da camada exterior, para que se mantenha com uma espessura sensivelmente constante, deve ter preferencialmente uma ligeira menor, senão no máximo igual, viscosidade do que a camada exterior (Goodship, 2004). A viscosidade de cada material pode ser influenciado pela temperatura mas preferencialmente a temperatura deve ser mantida constante de forma a minimizar todo o ciclo de injeção. A contração do material devido ao arrefecimento é outro dos parâmetros a analisar na seleção de materiais. Quando a injeção é feita por uma tecnologia em que os dois materiais são injetados em simultâneo, é importante reter que ambos também vão arrefecer em simultâneo, perdendo volume, o que pode resultar na sua separação, no caso de terem fatores de contração diferentes. Esta diferença de perda de volume é comum causar zonas de chupados, empenos e zonas de concentração de tensões. Qualquer um destes defeitos pode levar à rotura permanente da peça. Outra possibilidade é quando o segundo material é injetado sobre uma parte da peça que foi previamente moldada e já se encontra completamente, ou parcialmente arrefecida e com o volume final. A peça é introduzida em outro molde, onde a cavidade que a vai acolher deverá ter dimensão adequada considerando a contração (Love & Goodship, 2002).

## **7.7. Tecnologias de Injeção e Transferência**

### **7.7.1. Injeção com várias máquinas**

Este método utiliza várias máquinas de injeção para obter a peça final. Desta forma surge a necessidade de transferência da peça de uma máquina para a outra, o que implica retirar a peça de um molde e voltar a colocá-la em outro molde. Este processo pode ser feito manualmente ou por autómatos, mas de qualquer das formas, implica bastantes operações o que o torna bastante moroso. Outro problema associado a este processo é a contaminação das peças. Durante a transferência entre máquinas pode surgir contaminação nas peças o que pode causar a deficiente inserção na nova cavidade, ou defeitos estéticos nas superfícies visíveis. Devido à necessidade de incorporação da peça no novo molde é importante que se criem zonas de encaixe que garantam que a peça está fixa na posição correta quando se efetua a injeção do segundo material. Desta forma garante-se que o molde ao fechar não danifica a peça e a segunda injeção é efetuada na posição correta. Outro aspeto muito importante a considerar é a contração volumétrica devido ao arrefecimento. A cavidade que vai acolher a peça plástica terá de ser dimensionada considerando o fator de contração. Este método não é muito utilizado devido aos problemas enumerados anteriormente, no entanto permite o uso de máquinas de baixa tonelagem e também não requer o uso de equipamentos muito complexos.

### **7.7.2. Injeção com máquina com várias unidades de injeção**

A forma mais comum de obter peças com dois materiais, apesar de necessitar de máquinas de grandes dimensões, continua a ser pelo uso de apenas uma máquina que incorpore mais do que uma unidade de injeção. Desta forma, eliminam-se alguns dos problemas enunciados atrás, que recorrem a tecnologias que utilizam transferências de peças entre máquinas. Os três métodos mais comuns são: Molde rotativo, Molde com chapa indexada e Molde com bucha retrátil. Cada um dos métodos apresenta características, vantagens e desvantagens que os diferenciam.

### **7.7.3. Molde Rotativo**

A aplicação desta tecnologia implica que na máquina de injeção, do lado da extração, esteja montado um prato rotativo sobre o qual está apertado o molde. Um prato rotativo é um equipamento acessório montado sobre a máquina de injeção, onde um motor ligado a um par de rodas dentadas, faz rodar o molde para a posição pretendida. A rotação e posição do molde têm de ser controladas de forma a garantir as posições precisas de fecho. O sistema de guiamento do molde tem de ser projetado para que este possa ser aberto, rodado 180° e volte a fechar na posição de rodado. Este tipo de molde é tanto mais rentável quanto mais cavidades conseguir moldar em simultâneo. Na Figura 7-12 está representado um molde montado sobre um prato rotativo, que ilustra o número de injeções e as posições de injeção possíveis.

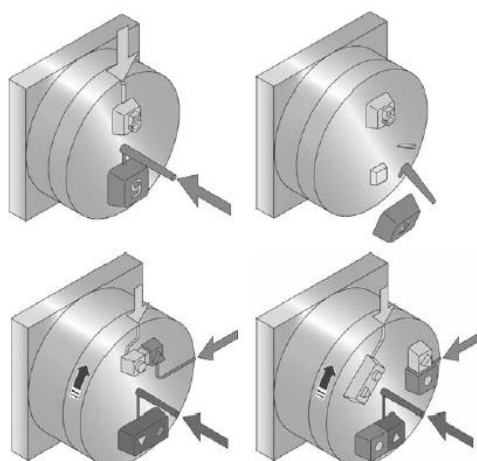


Figura 7-12- Molde Rotativo (Goodship, 2004).

O molde apresenta uma estrutura de dois tipos de cavidades diferentes, isto é, num lado A está a cavidade para a primeira moldação e num lado B está a cavidade para a segunda moldação. A peça plástica apenas fica completa após passar pelos dois estágios de injeção. Na primeira injeção, executada no lado A, é injetado o primeiro material, ou seja, apenas é moldada uma parte da peça. O molde é depois aberto, e as peças plásticas permanecem agarradas ao lado da extração. Como este lado do molde está fixo a um prato rotativo, que vai ser rodado 180°, todo lado da extração roda solidária com o prato. O molde é novamente fechado, inserindo as peças plásticas na cavidade B e deixando a cavidade A liberta para uma nova injeção. Com o molde fechado, na cavidade A é injetado o primeiro material moldando a mesma porção da peça e na Cavidade B é injetado o segundo material sobre parte das peças retiradas da cavidade A no estágio anterior. Desta forma, as peças na cavidade B ficam prontas e as da cavidade A encontram-se a meio do processo. Após cada ciclo, a extração faz-se apenas do lado da cavidade B pois é onde se encontram as peças completas. Como a injeção se dá nas duas cavidades apenas é necessário um estágio de refrigeração o que é importante, pois desta forma é reduzido o tempo de ciclo. A principal vantagem deste processo é a capacidade que tem de fazer dois tipos de moldação em paralelo, ou seja, no mesmo instante de tempo, injeta no lado A uma parte da peça e no lado B a restante parte, permitindo que no fim de cada ciclo sejam extraídas um conjunto de peças completas. Com a utilização deste método apenas é possível fazer sobre moldação do lado da cavidade (Centimfe, 2003).

#### 7.7.1. Molde com chapa Indexada

Esta tecnologia é bastante semelhante à do Molde rotativo. Neste caso a rotação das peças semi-acabadas é feita não pela totalidade da parte da extração mas apenas por uma chapa postiça. O método de injeção é semelhante, ou seja, numa primeira cavidade A é injetada parte da peça plástica com o primeiro material. O molde é aberto pela linha de junta, e neste caso existe uma chapa que avança de dentro do molde, que roda 180° e recua novamente. Este movimento pode ser descrito como o movimento típico de uma barra extratora típica da

indústria dos moldes, com o acréscimo do estágio intermédio de rotação. Neste chapa indexada estão alojadas as peças plásticas, que após passarem pelo primeiro estágio da cavidade A movem-se solidárias com a chapa indexada para a cavidade B onde será injetado o segundo material. Tal como no processo anterior também as peças só estarão concluídas após terminarem os dois estágios de injeção, aos quais se sucede a extração das peças contidas na cavidade B. É possível fazer sobre-moldação dos dois lados do molde, ou seja, o segundo material pode ser injetado do lado da cavidade ou do lado da bucha (Centimfe, 2003). Esta tecnologia implica também um sistema extra que permita o avanço, rotação e recuo da chapa indexada. Esta técnica permite a injeção simultânea das duas partes da peça. Deste modo é necessário apenas um estágio de refrigeração o que diminui o tempo de ciclo.

### 7.7.1. Molde com Bucha Retrátil

Neste tipo de tecnologia de injeção bi-material é utilizado um esquema de elementos móveis que ao deslocarem-se entre os estágios de injeção vão modificar a cavidade moldante. O sistema mecânico utilizado é semelhante ao usado com os elementos móveis utilizados para moldar negativos à junta. Num primeiro estágio é injetado o primeiro material, o qual é sucedido de um estágio de refrigeração. O molde é alterado pelo recuo das buchas móveis que vão modificar a cavidade moldante, criando novo espaço onde é possível injetar o segundo material. Depois de injetado o segundo material é necessário um segundo estágio de refrigeração e posterior extração da peça. Esta técnica é mais económica pois a tecnologia utilizada é menos complexa, no entanto exige dois estágios de refrigeração o que obriga a um ciclo de injeção mais longo. O estágio de movimento das buchas tem pouco impacto no tempo de ciclo total, pois de igual forma nas outras duas técnicas apresentadas atrás era necessário a abertura e rotação, o que não acontece nesta tecnologia.

Na Figura 7-13 estão representados os dois estágios de injeção desta tecnologia. No primeiro estágio em que se dá a injeção do primeiro material, a bucha impede a passagem do material e serve como zona moldante. No segundo estágio já com a bucha recuada, o segundo material é injetado na cavidade, descoberta pelo recuo da bucha. Esta tecnologia é bastante utilizada para a aplicação de perfis elastómeros em torno de peças rígidas (Centimfe, 2003).

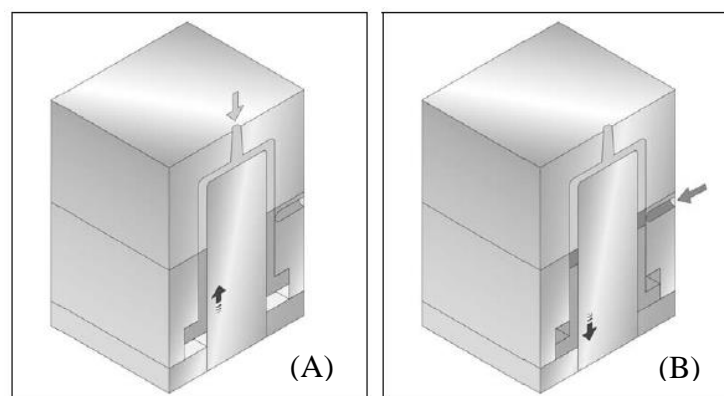


Figura 7-13- Molde com bucha retrátil (Goodship, 2004).

## 7.8. Configurações das máquinas de Injeção

A máquina de injeção é selecionada principalmente em função do tamanho do molde, estando o tamanho do molde diretamente ligado ao número de cavidades que se pretende moldar. Dependendo da geometria da peça, é necessário selecionar a melhor localização para o segundo ponto de injeção. Atualmente no mercado existe uma variedade muito grande de configurações possíveis de máquinas distribuídas pelas muitas marcas comerciais. No entanto é importante projetar o molde para a máquina que esteja disponível devido a tratar-se de uma tecnologia não muito comum e que pode acarretar custos elevados. Desta forma, apesar das muitas configurações possíveis existem quatro mais comuns: Paralelo, Perpendicular, Vertical e Paralelo por cima/baixo (Elsass, 2012). Na Figura 7-14 estão representadas algumas configurações de máquinas de injeção.

### 7.8.1. Máquinas Paralelas

Este método apresenta duas unidades de injeção paralelas que atravessam o prato da máquina. Normalmente este tipo de máquinas tem uma unidade centrada no prato de injeção e a outra unidade deslocada paralelamente o que permite o seu uso em injeção convencional. No entanto também existem máquinas exclusivas para injeção multi-material, pois as unidades não são centradas no prato da máquina, o que obriga a duas aberturas adicionais no prato, e o que impossibilita o uso da máquina para outro tipo de injeção.

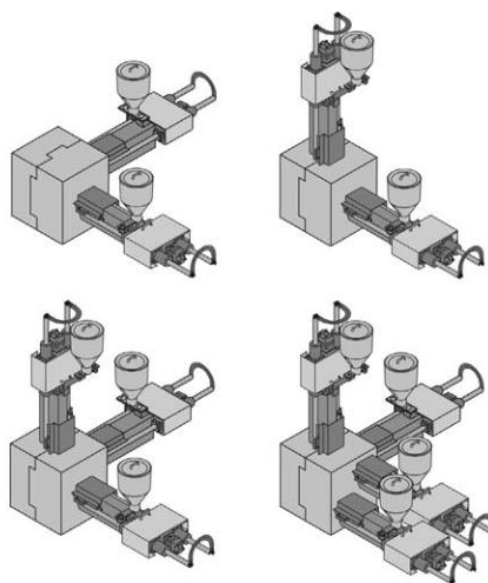


Figura 7-14- Configurações de Máquinas de Injeção Multi-material (Goodship, 2004).

### 7.8.2. Máquinas Perpendiculares

As máquinas com disposição das unidades de injeção de forma perpendicular são as mais utilizadas. A segunda unidade é montada do lado oposto ao lado do operador, deixando a

unidade principal de injeção na posição original. Este é o tipo mais versátil pois utilizando apenas a unidade principal, a máquina torna-se uma máquina de injeção convencional. Tem a desvantagem de ocupar bastante espaço mas a vantagem de permitir a montagem de um robot sobre a máquina.

### **7.8.3.Máquinas Verticais**

Este tipo tem a segunda unidade de injeção montada por cima da máquina. É mais utilizada em peças de pequena dimensão. Diminui a ocupação de espaço útil no chão da fábrica no entanto a exigência em espaço é requerida em altura. As peças são retiradas do molde por gravidade pois a segunda unidade de injeção não permite a montagem de robot.

### **7.8.4.Máquinas Paralelas por cima/baixo**

Este tipo de máquinas reúne as mesmas características que as máquinas paralelas convencionais que preservam a unidade principal de injeção ao centro do prato da máquina. A disposição da segunda unidade toma uma posição superior ou inferior em relação à unidade principal. De igual forma a máquina pode ser usada para injeção convencional se apenas se usar a unidade principal.

## 8. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

O capítulo dos resultados vai se dividido em dois subcapítulos. No primeiro será efetuada a análise aos algoritmos mono-objetivo, e no segundo será efetuada uma análise multi-objetivo. Os algoritmos utilizados são já referidos nos capítulos anteriores e todos têm formulação inspirada em fenómenos naturais.

### 8.1. Resultados da Otimização Mono-objetivo

De forma a otimizar o processo de otimização e também de confirmar a eficiência do PGA foi efetuada uma análise recorrendo aos quatro algoritmos bio inspirados descritos anteriormente. Uma análise semelhante foi efetuada anteriormente em outro caso de estudo utilizando os mesmos algoritmos inspirados na natureza (Carreira, Alves, Ramos, & Bártolo, 2013). Os resultados vão ser criticados e será sempre efetuada a comparação com os resultados obtidos pelo PGA. Os valores obtidos resultam de cinquenta execuções de cada um dos cinco algoritmos. Foi feita uma seleção prévia dos resultados e apenas foram consideradas soluções em que o algoritmo respeitasse todos os constrangimentos impostos.

Os resultados são apresentados por cinco análises: a análise de convergência, onde se analisa a capacidade de o algoritmo de convergir mais rapidamente para soluções mínimas; a robustez que caracteriza a capacidade de encontrar sempre a mesma solução mínima em cada uma das execuções; a simplicidade, ou seja, o tempo necessário para concluir a análise; a dispersão das variáveis onde se analisa a capacidade do algoritmo para cobrir todo o hiperespaço das variáveis e a otimalidade onde se verifica qual dos algoritmos atingiu o mínimo tempo de ciclo. A função objetivo do problema a otimizar é a Equação ( 40 ), ou seja a equação que transcreve o tempo de ciclo para um processo de injeção, multi-material, de polímero sobre tecido pré impregnado. As variáveis de projeto e os seus limites, que definem o espaço de procura, e as respetivas unidades estão apresentadas no Quadro 8-1.

Quadro 8-1 – Intervalos das variáveis de projeto.

Variáveis de Projeto	Limites	Unidades
$s_{gate}$	0.003 – 0.007	[ m ]
$d_{release}$	0.065 – 0.080	[ m ]
$d_{runner}$	0.004 – 0.007	[ m ]
$l_{gate}$	0.005 – 0.012	[ m ]
$l_{runner}$	0.020 – 0.050	[ m ]
$P_{inj}$	30 - 150	[MPa]
$T_{cool}$	293 – 303	[ K ]
$T_{demol}$	333 – 353	[ K ]
$T_{melt}$	490 - 510	[ K ]

**8.1.1. Análise da convergência**

A análise da convergência mostra a melhor solução encontrada em cada uma das cinquenta execuções. Como o que se pretende é encontrar a solução mínima para o problema, foram impostos critérios de paragem, pois é sabido, que para um maior número de iterações a probabilidade de se encontrarem melhores soluções é maior, no entanto, o tempo necessário é também significativamente superior. Desta forma definiu-se um valor máximo de quatrocentas iterações para cada execução. Na Figura 8-1 estão os gráficos de convergência para os algoritmos GA, ABC, na Figura 8-2 os gráficos dos algoritmos FA, PSO e na Figura 8-3 o gráfico da convergência para o algoritmo PGA.

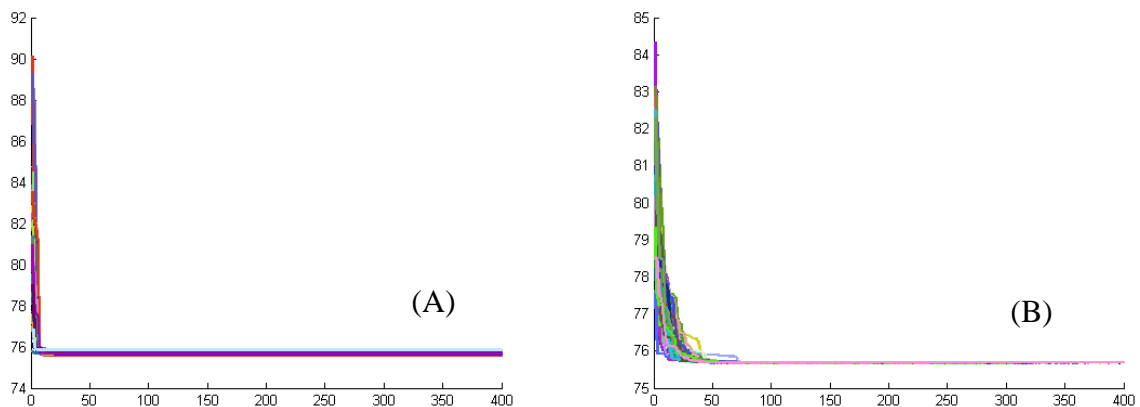


Figura 8-1- Gráficos de convergência (A)GA, (B)ABC.

Analisando as figuras pode-se verificar que o algoritmo que mais rapidamente converge para a solução mínima, ou seja, que necessita de menos iterações para atingir um mínimo, é o algoritmo GA. Este algoritmo necessita sensivelmente de 25 iterações para atingir a solução mínima ou uma solução bastante perto do mínimo. No algoritmo ABC o mínimo é atingido entre a 30ª e a 75ª iterações.

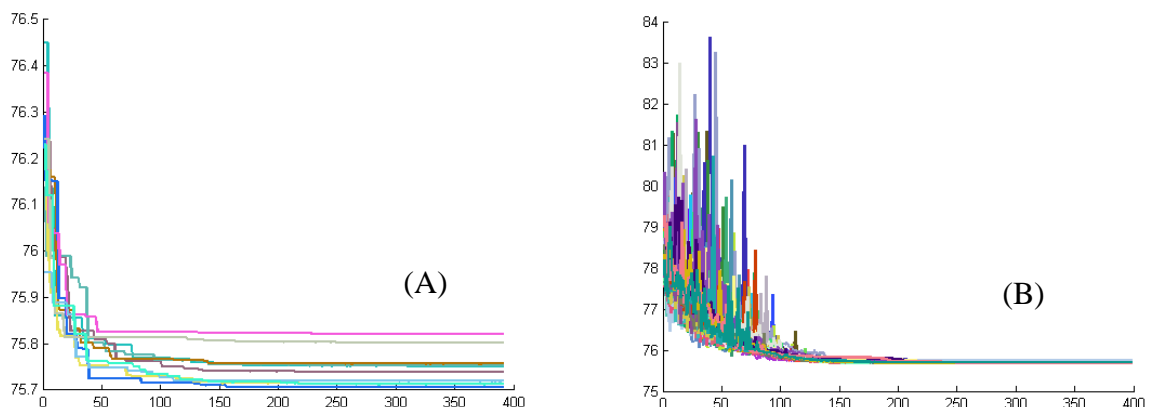


Figura 8-2- Gráficos de convergência (A)FA, (B)PSO.

Tanto o algoritmo FA como o PSO apresentam três fases bastante distintas. No FA a primeira fase de maior oscilação nos resultados encontra-se situada até à 50ª iteração, os resultados

tendem a estabilizar até à 150ª solução e após esta a solução é praticamente a mesma. De salientar ainda, que existe um grande intervalo de soluções mínimas mas a primeira solução encontrada em cada uma das execuções é inferior à encontrada pelos outros algoritmos. No algoritmo PSO as três fases têm marcos diferentes, até à 125ª solução existe uma grande diversidade de soluções, que é uma característica do método de busca deste algoritmo, um intervalo de estabilização onde a oscilação é mínima até à 200ª solução e após esta iteração a solução não sofre praticamente oscilação.

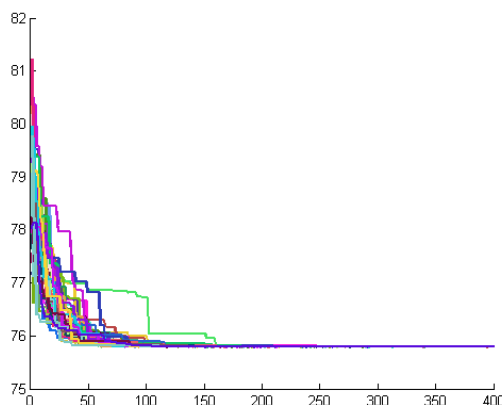


Figura 8-3- Gráfico de convergência PGA.

No algoritmo PGA a convergência não segue a mesma tendência do GA pois os operadores não estão programados na mesma forma, e o comportamento do algoritmo durante a busca não é o mesmo. No entanto a convergência é conseguida para valores semelhantes dos restantes algoritmos. O comportamento durante a procura é mais semelhante aos algoritmos FA e PSO pois apresentam as três fases de aproximação à solução final. Pode-se ainda observar que a solução para as cinquenta execuções é praticamente a mesma.

### 8.1.2. Análise da robustez

Um algoritmo é considerado tanto mais robusto quanto menor for a dispersão de soluções finais, em execuções distintas dentro das mesmas condições de cálculo. É comum existir dispersão nas soluções, uma vez que se está a analisar algoritmos não deterministas e de formulação estocástica, no entanto a convergência deve ser dirigida para um único mínimo, que será a melhor solução para o problema em questão. A análise de robustez foi efetuada considerando o desvio padrão entre as melhores cinquenta soluções. Desta forma, a solução da convergência considerada, foi o valor médio e não o valor mínimo conseguido pelo algoritmo. Pela análise das figuras da análise da convergência e pelo Quadro 8-3 que o algoritmo com menor desvio-padrão é o algoritmo ABC. Este algoritmo atingiu sempre o mesmo mínimo nas cinquenta execuções, ou seja chegou sempre à mesma solução mesmo partindo sempre de pontos aleatórios do espaço de procura. Os algoritmos seguintes foram o GA e o PSO com desvios semelhantes e com piores resultados o FA e o PGA. Apesar de

existirem valores de desvio padrão díspares para todos os algoritmos, pode-se concluir que todos obtiveram resultados muito semelhantes, pois em termo de análise de tempo, a diferença está em décimos de segundo, o que do ponto tecnológico não apresenta um prejuízo significativo ao processo.

### 8.1.3. Análise da Simplicidade

A análise da simplicidade mede a capacidade de cada algoritmo de encontrar a melhor solução no menor período de tempo. No Quadro 8-2 estão os tempos que cada um dos algoritmos obteve nas 50 execuções. É sabido que os parâmetros que controlam os algoritmos têm uma influência muito grande na forma como este se comporta durante as execuções, mas também nos resultados obtidos. Nesta análise foi tida em conta não o número de avaliações da função objetivo mas o número de gerações, o que teve um peso muito grande em termos de tempo necessário para alguns algoritmos. O algoritmo que mais foi prejudicado foi o GA pois devido à sua formulação efetuou 3765160 avaliações da função objetivo nas 400 gerações a que foi submetido, o que justifica a enorme quantidade de tempo necessária para concluir cada execução. No entanto é de referir que na análise da convergência um valor muito perto do mínimo foi alcançado sensivelmente pela 20ª geração, o que leva a concluir que o algoritmo teria uma performance muito mais elevada se menos gerações fossem contabilizadas. Os algoritmos PSO e FA efetuaram o mesmo número de avaliações da função objetivo ( $n \cdot N = 40 \cdot 400$ ), ou seja 16000 avaliações. O melhor resultado foi obtido pelo algoritmo ABC que teve a melhor prestação em termos de tempo requerido para concluir a análise. Este algoritmo efetua ( $2 \cdot SN \cdot MCN = 2 \cdot 6 \cdot 400$ ) 4800 avaliações da função objetivo, o que pode justificar o menor tempo necessário para concluir cada avaliação.

Quadro 8-2 – Resumo de tempo algoritmos mono-objetivo.

	GA	ABC	PSO	FA	GPA	
Best	654,235	0,0013	0,912	2,843	5,717	[s]
Worst	881,486	0,2394	1,119	4,492	7,858	[s]
Mean	767,861	0.1181	0,971	3,467	7,092	[s]
Std. Dev.	160,691	0.0687	0,086	0,500	0,437	[s]

### 8.1.4. Dispersão das variáveis

Pela análise da dispersão das variáveis pode-se concluir acerca da habilidade que cada algoritmo tem para cobrir o hiperespaço das variáveis. Quanto maior for o espaço analisado pelo algoritmo maior é a probabilidade de se encontrar um mínimo absoluto ao invés de um mínimo local. A Figura 8-4, a Figura 8-5 e a Figura 8-6 representam a dispersão das variáveis

de projeto no espaço de procura para os algoritmos FA, ABC, FA, PSO e GPA respetivamente.

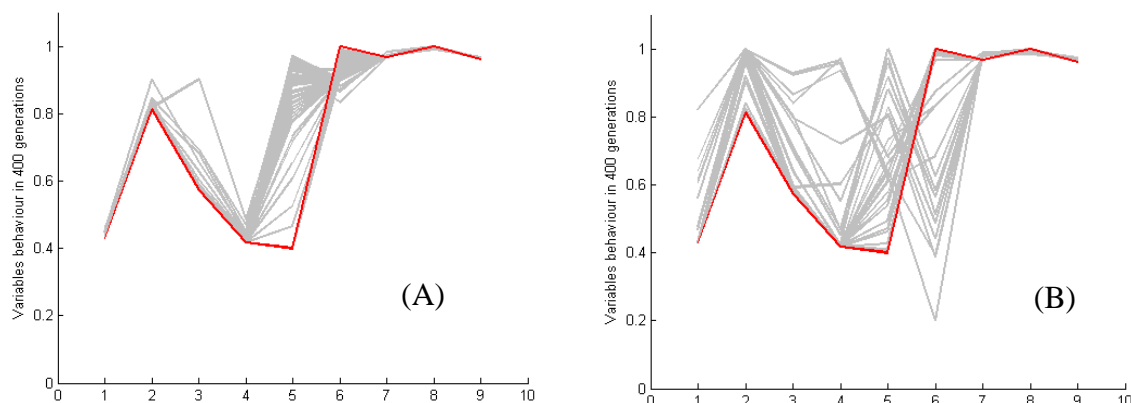


Figura 8-4- Dispersão das variáveis em 400 gerações (A)GA, (B)ABC.

A representação é feita em percentagem pois os valores das variáveis de projetos são muito díspares, o que tornaria a sua representação gráfica impossível.

As linhas a cinza representam a melhor solução de cada uma das gerações e a vermelho está a melhor solução de todas.

Pela análise das figuras pode-se concluir que todos algoritmos encontraram soluções bastante semelhantes pois a linha a vermelho está em pontos sensivelmente comuns em todas as figuras.

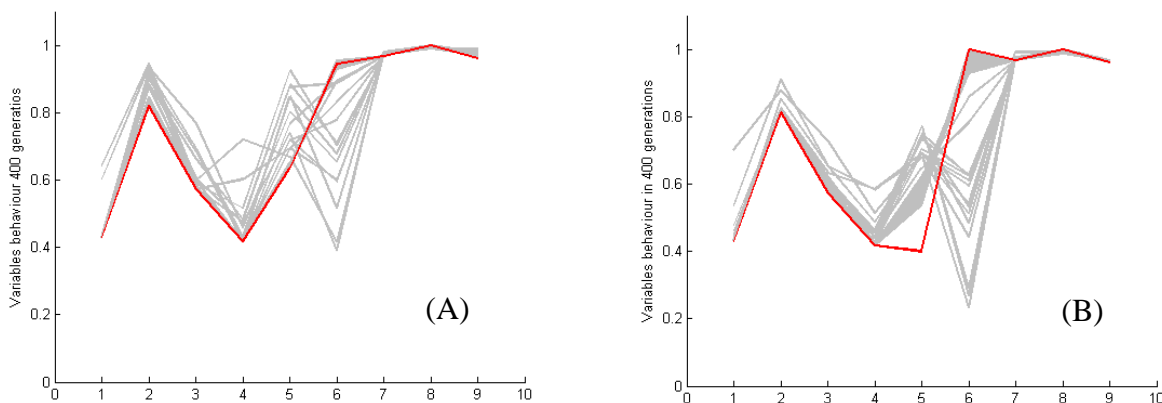


Figura 8-5- Dispersão das variáveis em 400 gerações (A)FA, (B)PSO.

O algoritmo que tem maior espaço coberto é o ABC, pois é o que tem mais pontos testados. Pode-se ainda observar que a melhor solução para todos os algoritmos são os valores mínimos testados para quase todas as variáveis.

O algoritmo PGA encontrou soluções semelhantes aos restantes algoritmos, e neste algoritmo é ainda mais visível que a melhor combinação de variáveis é o valor mínimo testado para cada uma. Pela solução encontrada leva mais uma vez a concluir a veracidade dos resultados

apresentados pelo algoritmo PGA. Como melhor algoritmo na análise de dispersão pode-se concluir que o ABC cobriu de forma mais eficaz o espaço de busca. O resultado obtido pode ser entendido como sendo mínimo global pois todos os algoritmos apresentam soluções semelhantes.

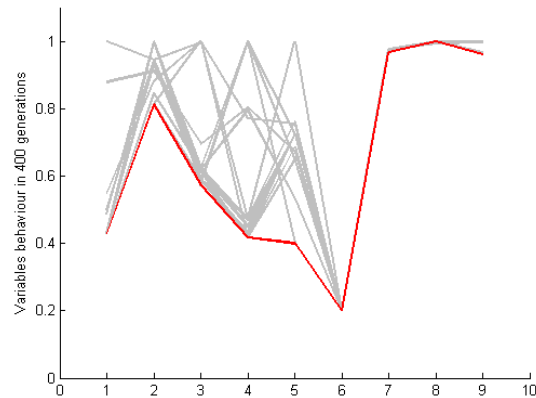


Figura 8-6- Dispersão das variáveis em 400 gerações GPA.

Outra análise possível é acerca das soluções ótimas encontradas em cada uma das cinquenta execuções. As Figura 8-7, Figura 8-8 e Figura 8-9 representam as variáveis de projeto ótimas em cada uma dessas execuções. Todos os algoritmos apresentam semelhanças nos valores de cada uma das variáveis, pois a linha a vermelho em todos os gráficos é praticamente igual.

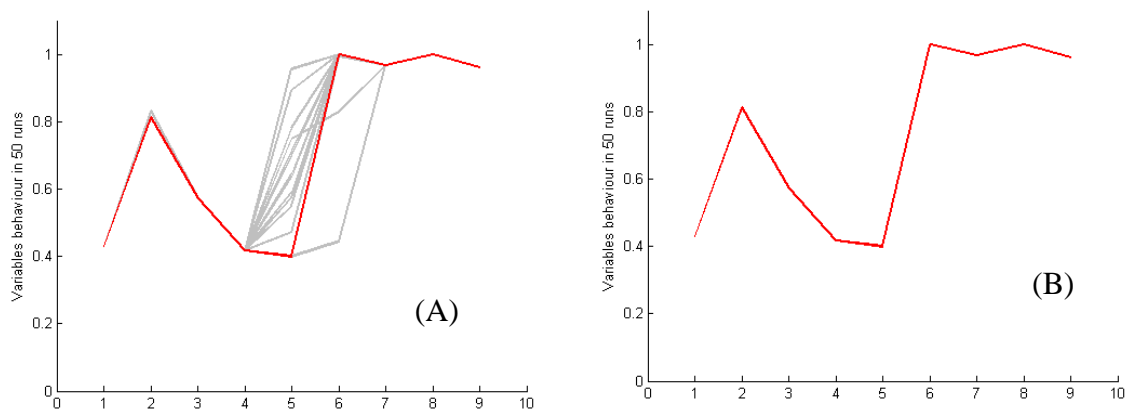


Figura 8-7- Dispersão das variáveis em 50 execuções (A)GA, (B)ABC.

Numa análise mais cuidada pode-se observar que nas primeiras quatro variáveis quase não existe dispersão nas soluções, pois apenas se consegue distinguir nas figuras a linha a vermelho. No entanto nas figuras dos algoritmos GA, FA e PSO são visíveis algumas outras soluções. A variável cinco e seis são as que mais oscilam para esses mesmos algoritmos, sendo que as últimas três variáveis são praticamente iguais para todos os algoritmos.

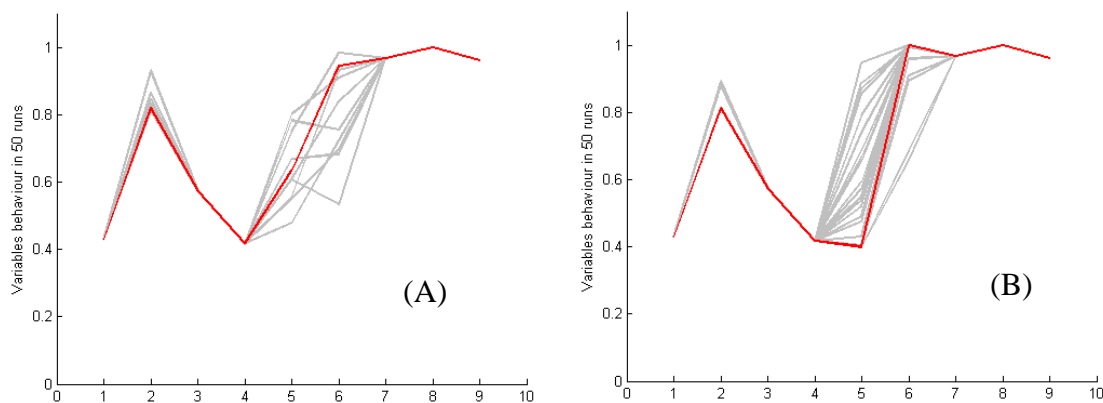


Figura 8-8- Dispersão das variáveis em 50 execuções (A)FA, (B)PSO.

O algoritmo GPA apresenta praticamente sempre as mesmas variáveis, apesar de apresentar alguma dispersão na solução, ótima. No entanto os resultados apresentados são bastante satisfatórios uma vez que são bastante semelhantes aos dos restantes algoritmos. Não se podem tirar conclusões acerca da habilidade dos algoritmos pela análise da dispersão das soluções finais, uma vez que um maior valor numa das variáveis pode ser compensado por um valor menor em uma das outras. Apenas deve ficar explícito que apesar de haver uma grande disparidade nos valores de algumas das variáveis em alguns algoritmos, os resultados finais são bastante semelhantes para todos os algoritmos.

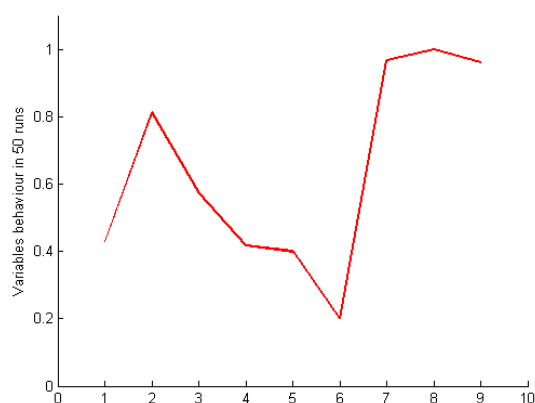


Figura 8-9- Dispersão das variáveis em 50 execuções GPA.

### 8.1.5. Análise da otimalidade

A otimalidade demonstra simplesmente qual o algoritmo que conseguiu encontrar a melhor solução respeitando todos os constrangimentos impostos. O algoritmo com o melhor valor médio, como já foi referido, foi o ABC, e com isto teve o menor valor de desvio padrão. O pior valor médio foi o alcançado pelo algoritmo PGA seguido do algoritmo FA. O pior valor de todos foi também alcançado pelo algoritmo PGA. Ainda que se esteja a fazer uma distinção nos valores alcançados, todos os algoritmos chegaram a valores muito semelhantes, e a diferença entre eles em unidades de tempo, correspondem a alguns décimos de segundo, o

que é uma diferença muito reduzida. A melhor solução, como se pode observar no Quadro 8-3 foi encontrada pelo algoritmo ABC.

Quadro 8-3 – Soluções ótimas algoritmos mono-objetivo.

	GA	ABC	PSO	FA	PGA
Best	75,688494	75,684695	75,684713	75,705496	75,787187
Worst	75,706531	75,684695	75,696415	75,861682	75,924512
Mean	75,696144	75,684695	75,688079	75,768027	75,855850
Std. Deviation	0,005780	0,000000	0,0048773	0,0521012	0,0686620

As variáveis de projeto que originam as soluções ótimas do problema do ciclo de injeção estão apresentadas no Quadro 8-4.

Quadro 8-4 – Soluções ótimas das variáveis de projeto e função objetivo para algoritmos mono-objetivo.

Variáveis de Projeto	GA	ABC	PSO	FA	PGA	Unid.
$s_{gate}$	0.003002115149	0.003	0.00300008817	0.003	0.003	[ m ]
$d_{release}$	0.065007331267	0.065	0.065000003108	0.075056427321	0.065	[ m ]
$d_{runner}$	0.004003337879	0.004	0.004000000000	0.004	0.004	[ m ]
$l_{gate}$	0.005012955698	0.005	0.005000504415	0.005	0.005	[ m ]
$l_{runner}$	0.020024314961	0.02	0.020000003048	0.024901366641	0.02	[ m ]
$P_{inj}$	149.9094626578	150	149.9144744964	117.67674422632	300	[MPa]
$T_{cool}$	293.0282374389	293	293.0000000161	293	293	[ K ]
$T_{demol}$	352.997689743	353	352.9999999162	353	353	[ K ]
$T_{melt}$	490.017200133	490	490.0000001101	490	490	[ K ]
$t_c$	75,688494	75,684695	75,684713	75,705496	75,787187	[ s ]

As soluções para as variáveis de projeto apresentam algumas características para cada um dos algoritmos. Os algoritmos GA e o PSO apresentam modificação nos valores de todas as variáveis, enquanto os restantes algoritmos apresentam algumas soluções com valores inteiros e efetuam modificações apenas em algumas variáveis. O algoritmo ABC, que conseguiu o resultado mínimo para o problema em estudo, apenas utilizou valores dos limites. O algoritmo PGA utilizou exatamente os mesmos valores modificando apenas a variável seis, o que originou uma penalização no resultado final.

## 8.2. Resultados da Otimização Multi-objectivo

O algoritmo utilizado para a otimização multi-objectivo foi o algoritmo genético contido na aplicação computacional *Matlab*. As três funções objetivo a otimizar são a queda de pressão, o tempo de ciclo e o volume de material, como já foi referido anteriormente. Na Figura 8-10, Figura 8-11 e Figura 8-12 são apresentadas as frentes de Pareto, em que se pode observar o cruzamento das soluções finais, ou seja, as frentes não dominadas, para as três funções objetivo. Pela definição de frente não dominada, analisada no Capítulo 2.9.3, todas as soluções apresentadas no Quadro 14-1 do Anexo-1 são soluções ótimas e nenhuma delas se pode destacar como sendo melhor que as outras, pois uma solução ótima para uma das funções objetivo pode não o ser para uma das outras funções objetivo. Cabe ao agente de decisão decidir qual a melhor solução para o seu problema, se for dado o mesmo grau de importância a todas as funções objetivo. A Figura 8-10 mostra a frente de Pareto das soluções das funções objetivo da queda de pressão e do tempo de ciclo. Duas soluções possíveis estão assinaladas e que poderiam ser as escolhidas pelo agente de decisão. A escolha destas duas soluções deve-se ao facto de serem os dois pontos mais próximos da origem, ou seja, representam os dois pontos que minimizam as duas funções sem prejudicar nenhuma das outras. Recorrendo ao Quadro 14-1 esses pontos correspondem às soluções 7 e 10.

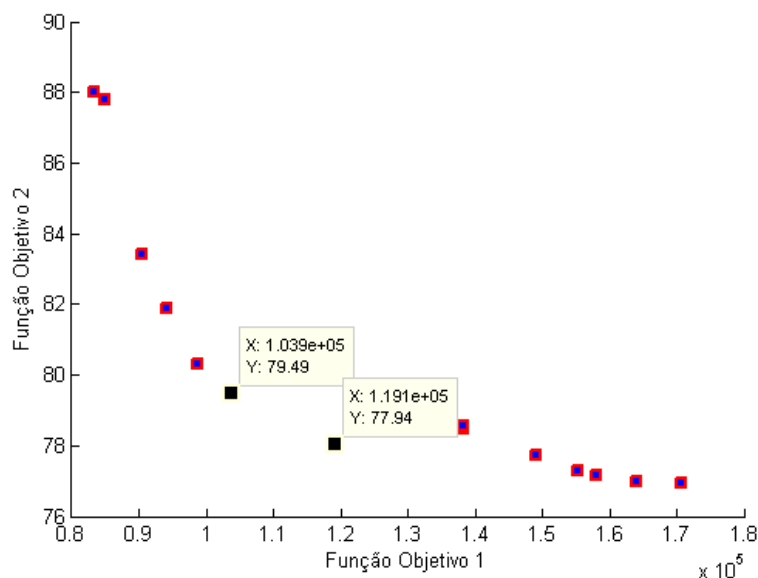


Figura 8-10- Frente de Pareto da Queda de pressão (1) vs Tempo de ciclo (2) .

A mesma análise para Figura 8-11 que cruza as soluções da queda de pressão com o volume de enchimento, e seguindo o mesmo critério para a seleção de pontos, encontra-se as soluções 7 e 10. Nas duas primeiras seleções, as soluções encontradas foram as mesmas no entanto tal poderia não ter sucedido.

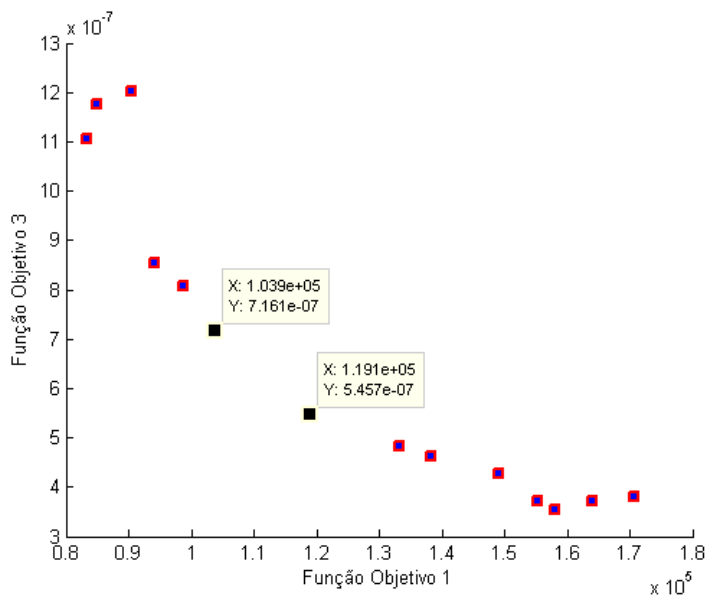


Figura 8-11- Frente de Pareto da Queda de pressão (1) vs Volume de enchimento (3) .

Fazendo novamente a mesma análise para a Figura 8-12 que cruza o tempo de ciclo com o volume de enchimento, as soluções encontradas são as soluções 1 e 2. Nesta terceira seleção as soluções encontradas são diferentes, no entanto todas as soluções apresentadas são soluções não dominadas.

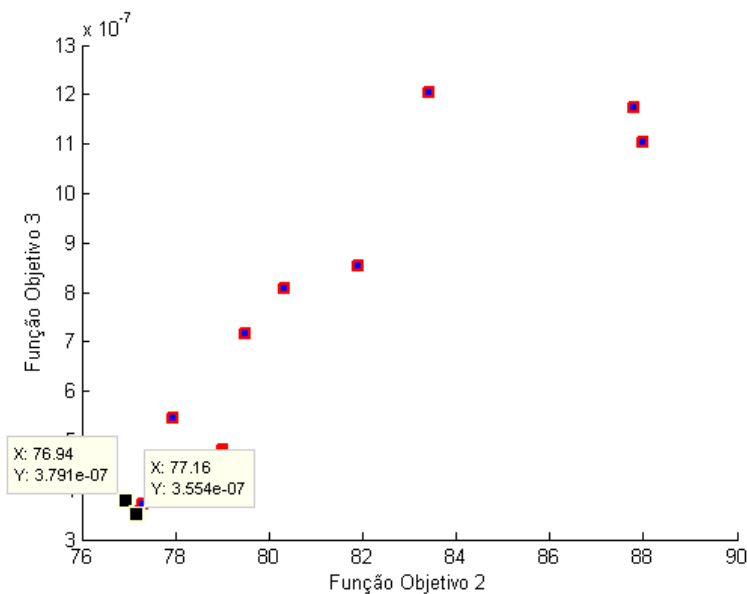


Figura 8-12- Frente de Pareto da Tempo de ciclo (2) vs Volume de enchimento (3) .

As soluções apresentadas na Figura 8-13 representam todas as soluções encontradas, ou seja todas as frentes não dominadas, no hiperespaço das funções objetivo. Pode-se ainda observar as quatro soluções selecionadas nas figuras anteriores como sendo os pontos ótimos. Num processo tecnológico como o que se analisa neste trabalho, da construção de uma ferramenta mecânica, um molde, para a injeção de peças plásticas, obriga a que a escolha recaia apenas

em uma das soluções, uma vez que cada uma das soluções implica a construção de um molde diferente.

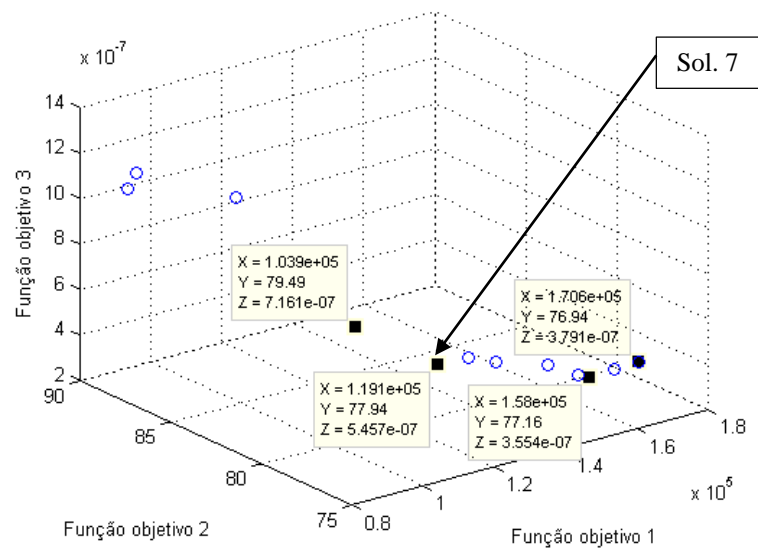


Figura 8-13- Dispersão das variáveis de projeto para as 3 funções objetivo.

Fazendo o autor o papel de agente de decisão a escolha seria o ponto correspondente á solução 7 do Quadro 14-1. Este ponto aparenta estar num a posição espacial que tende a minimizar todas as funções objetivo. Motivo para a seleção foi também o facto de ser um dos pontos seleccionados no cruzamento das funções objetivo isoladamente por duas vezes.

### 8.3.Comparação dos resultados da Otimização Mono /Multi-objetivo

Apesar de o funcionamento dos algoritmos ser bastante diferente quando se faz a comparação entre otimização mono-objetivo e otimização multi-objetivo, no Quadro 8-5 estão representados todos os resultados obtidos para a otimização do tempo de ciclo. Todos os algoritmos mono-objetivo apresentam melhores soluções que o algoritmo multi-objetivo, no entanto os mono apenas tentavam otimizar uma função objetivo. O algoritmo multi-objetivo consegue apresentar uma solução em que demora mais 2 segundos a cumprir o ciclo. Outro ponto que se destaca na análise dos resultados é que o algoritmo multi-objetivo na variável  $P_{inj}$  utilizou um valor perto do mínimo do intervalo enquanto que os mono utilizaram valores perto do limite superior.

Quadro 8-5 – Comparação de resultados entre mono/multi-objetivo.

Var. Projeto	Mono					Multi	Unid.
	GA	ABC	PSO	FA	PGA	GA	
$s_{gate}$	0.003002	0.003	0.003000	0.003	0.003	0.003478	[ m ]
$d_{release}$	0.065007	0.065	0.065000	0.075056	0.065	0.070231	[ m ]
$d_{runner}$	0.004003	0.004	0.004000	0.004	0.004	0.005290	[ m ]
$l_{gate}$	0.005012	0.005	0.005000	0.005	0.005	0.005274	[ m ]
$l_{runner}$	0.020024	0.02	0.020000	0.024901	0.02	0.020324	[ m ]
$P_{inj}$	149.909462	150	149.914474	117.676744	300	57.155127	[MPa]
$T_{cool}$	293.028237	293	293.000000	293	293	296.28234	[ K ]
$T_{demol}$	352.997689	353	352.999999	353	353	351.02081	[ K ]
$T_{melt}$	490.017200	490	490.000001	490	490	497.46981	[ K ]
Tempo	75.688494	75.684695	75.684713	75.705496	75.787187	77.941061	[ s ]

## 9. FERRAMENTA MOLDE

O molde apresentado, é uma ferramenta que se pretende utilizar para produzir peças de com elevadas características de resistência mecânica em material polimérico reforçado com as fibras longas presentes nos tecidos pré-impregnados. O atual conceito para a produção de peças com características semelhantes obriga a ter duas ferramentas molde, onde o primeiro é utilizado para obter a primeira forma, com o tecido pré-impregnado por termoformação, que depois é transferida para outro molde para a segunda operação de sobremoldação (Shappe, 2012). Com a utilização da ferramenta apresentada pretende-se obter as mesmas peças com apenas um molde, levando a uma significativa redução de custos.

Com os dados obtidos da otimização, procedeu-se à construção do molde de injeção com as características referidas atrás. Esta ferramenta será ainda utilizada para validar os resultados do otimizador e para trabalhos futuros, de análise do atrito entre tecidos pré impregnados com as buchas moldantes e conseqüentemente a determinação das forças de extração envolvidas. Servirá também esta ferramenta para otimizar a curva do processo, principalmente nas fases de aquecimento e arrefecimento do molde.

### 9.1. Peça plástica

As variáveis de projeto otimizadas referentes aos canais de abastecimento são as representadas na Figura 9-1, as restantes dizem respeito a parâmetros de processamento.

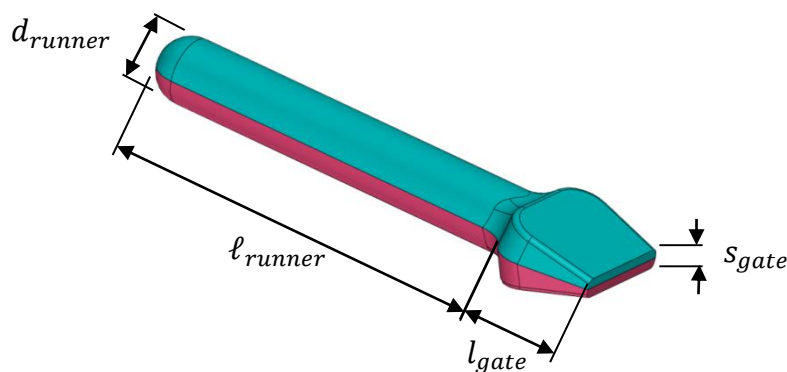


Figura 9-1 - Canal de Injeção.

A peça plástica para este teste é uma peça de revolução, semelhante a um copo de forma a facilitar tanto o processo de moldação como o de extração. A escolha desta geometria prende-se ainda pelo facto de os tecidos pré-impregnados que se pretendem utilizar são mangas, e desta forma, fica facilitada a sua colocação na bucha moldante.

A peça é reforçada no seu interior pelo tecido pré-impregnado e o polímero será injetado sobre o tecido, num processo idêntico ao *overmolding*. Pela análise efetuada nos Capítulos 6 e 7 e após a otimização efetuada no Capítulo 8, pretende-se aplicar todos esses conceitos neste processo de forma a obter peças com gradientes funcionais.

O molde projetado para este processo não é um molde convencional na maioria dos sistemas que o compõem, no entanto nos sistemas convencionais seguiram-se as melhores práticas descritas no manual do projetista (Centimfe, 2003).

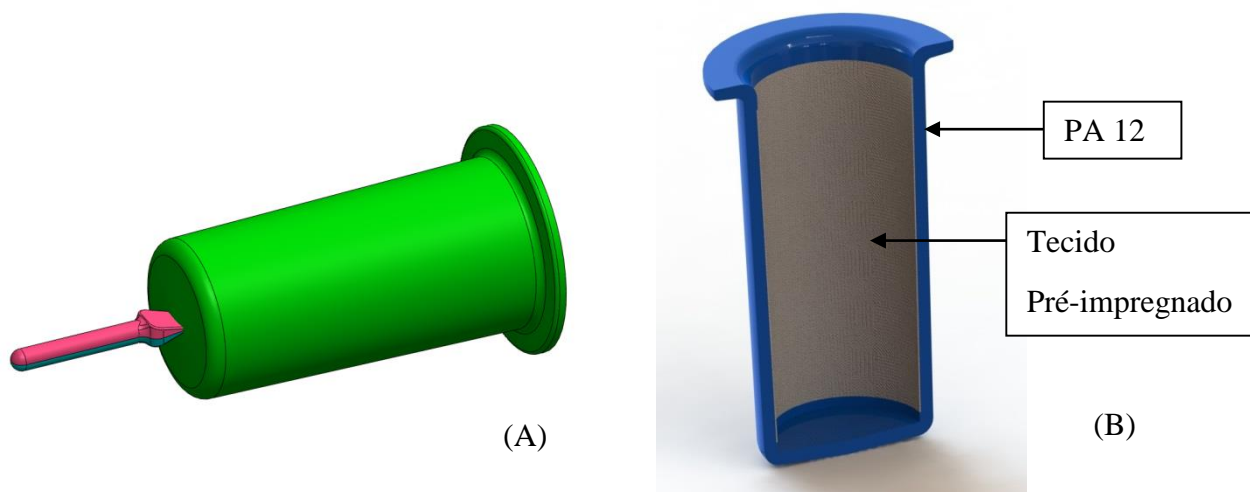


Figura 9-2 – Peça plástica com canal de Injeção (A); Secção da peça plástica com tecido (B).

## 9.2. Estrutura do Molde

A estrutura do molde é formada por três chapas principais. A chapa da Injeção, onde está colocado o sistema de injeção, a chapa da cavidade que é a chapa que suporta a cavidade e a chapa da bucha que é a chapa que suporta a bucha. A chapa da injeção e a bucha têm ainda a função adicional de serem utilizadas para fixar o molde á máquina de injeção.

## 9.3. Sistema de Injeção

O sistema de injeção é um sistema automático formado por um bico de injeção e um carburador. Este tipo de alimentação apesar de mais dispendioso permite um melhor controlo do processo de injeção e minimiza bastante os desperdícios de material. Este sistema permite que o material dentro do molde, esteja sempre á temperatura ideal de processamento, pois transporta o material desde a máquina de injeção até ao canal da Figura 9-1. Ou seja, desta forma o único material desperdiçado é o do canal de abastecimento.

## 9.4. Sistema de aquecimento e de arrefecimento

Para que seja possível o processamento dos tecidos e para promover a adesão do material polimérico contido no tecido com o material injetado, o molde necessita de ser aquecido até à temperatura de processamento. O aquecimento é efetuado por resistências que contornam toda a periferia da peça. Novamente a geometria selecionada para a peça permite aplicar o conceito de *conformal heating* e de *conformal cooling* o que significa um aumento de eficácia tanto no

sistema de arrefecimento como no de aquecimento. Na Figura 9-3, que é uma secção transversal do molde, estão representadas os sistemas de refrigeração e de aquecimento. O molde é composto por três sistemas independentes de arrefecimento, um no interior da cavidade, outro no interior da bucha e um terceiro nos postiços que fazem o interior da peça. Os furos de refrigeração estão representados a azul. O sistema de aquecimento é formado por resistências colocadas nos mesmos elementos moldantes. Ao todo são colocadas dez resistências de forma a maximizar o calor colocado no interior do molde para que o aquecimento seja ao mais breve possível. As resistências estão representadas a vermelho. A peça plástica está representada a verde.

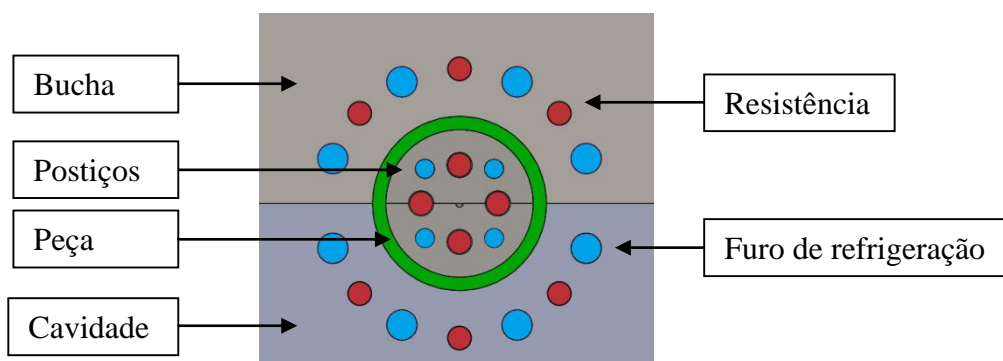


Figura 9-3 – Sistemas de refrigeração e aquecimento.

### 9.5. Abertura do molde e extração da peça

Após o arrefecimento do molde, este é aberto para que seja possível a extração da peça. Como um dos objetivos é a medição das forças de extração, considerações não convencionais tiveram de se tomadas na construção dos sistemas de abertura e extração. Na Figura 9-4 está representada a cinemática da abertura do molde e extração da peça plástica.

A abertura inicia imediatamente após o arrefecimento do molde (Figura 9-4-A). A máquina de injeção inicia o movimento de abertura levando consigo o lado da extração do molde. O lado da extração move-se solidário com o elemento móvel que segura os postiços moldantes devido a um sistema de trincos e arrastadores montados entre o elemento móvel, chapa da cavidade e chapa da bucha. Na Figura 9-5 está representado o sistema responsável por este processo. O molde ao abrir vai arrastar o elemento móvel devido à fricção causada pelo arrastador até esgotar o curso definido pelo limitador (Figura 9-4-B). Neste ponto o limitador fixa o elemento móvel vencendo a força do arrastador. O lado da extração continua a abrir deixando para trás o elemento móvel, que fica suspenso por guias (Figura 9-4-C).

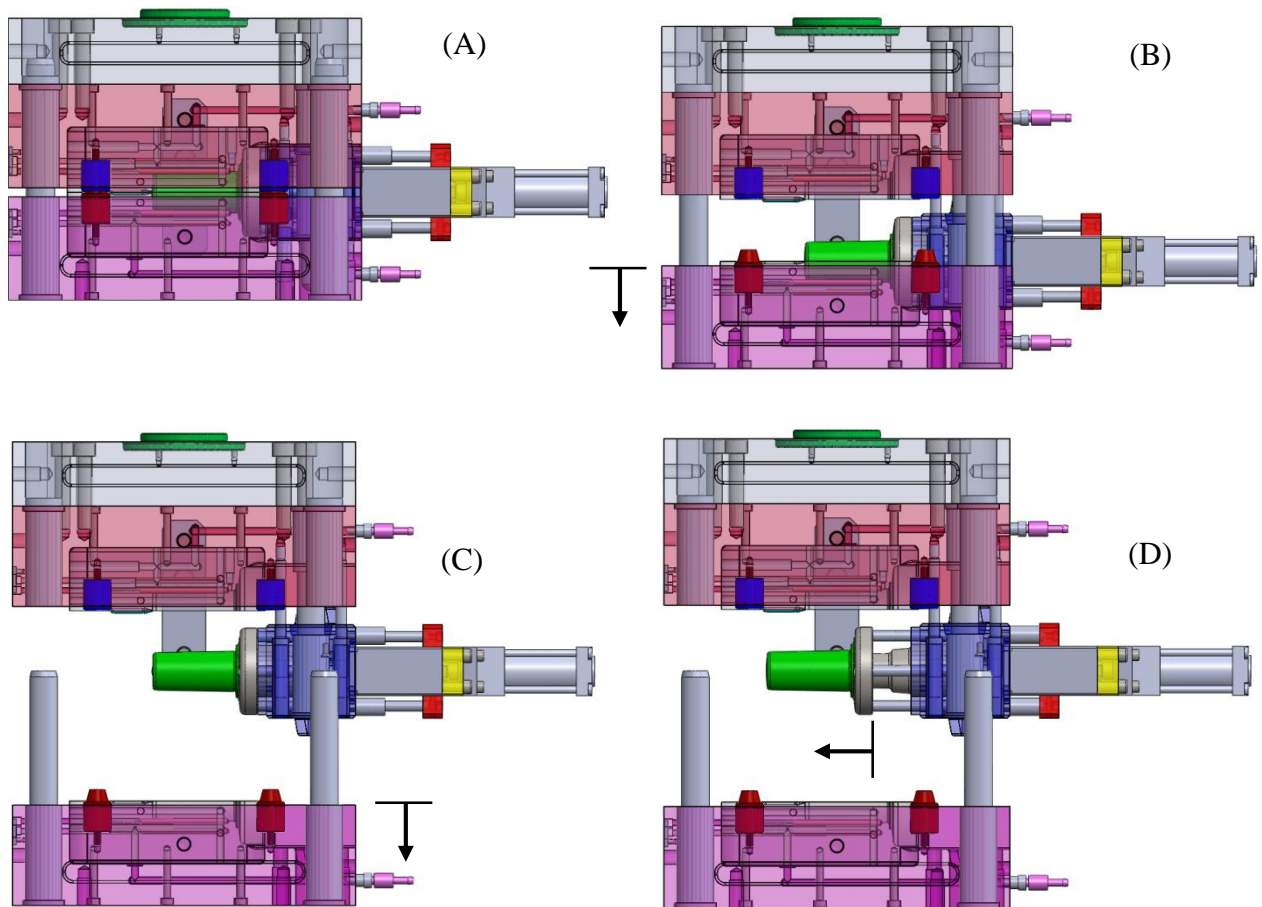


Figura 9-4 – Cinemática da abertura e extração da peça.

Depois do molde aberto, as faces exteriores da peça plástica recém formada, ficam liberas e esta pode ser extraída do molde. A extração é efetuada por um sistema hidráulico colocado no exterior do molde e ligado por hastes a um anel extrator. O acionamento do hidráulico faz avançar o anel extraíndo a peça que cai por gravidade (Figura 9-4-D). O molde efetua o percurso inverso e é iniciado um novo ciclo de injeção.

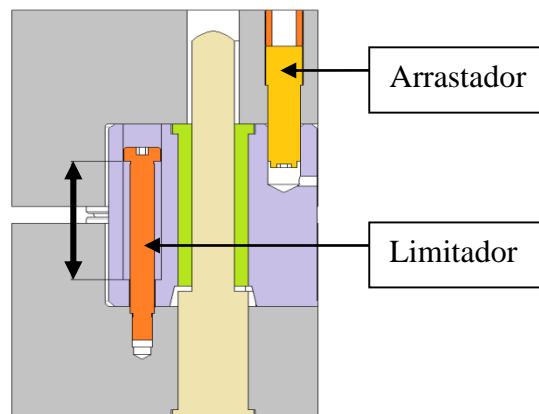


Figura 9-5 – Sistema de trinco e arrastador.

### 9.1. Monitorização e controlo do ciclo de injeção

Para que todo o processo seja controlado, foram incorporados sensores de temperatura, pressão e força em pontos específicos do molde. Os sensores de temperatura servem principalmente para controlar as fases de aquecimento e arrefecimento, e desta forma tornar possível o registo de todo o processo em termos de temperaturas. Os sensores de pressão servem para confirmar variações de pressão ao longo do ciclo de injeção. Ambos estes sensores estão colocados do lado interior da peça plástica ou seja, nos posições internos e também na bucha e cavidade. Desta forma é possível monitorizar ambos os lados da peça plástica. O sensor de força é colocado em frente à haste do cilindro hidráulico, e só desta forma é possível registar a força exata necessária para desmoldar a peça. Na Figura 9-6 estão as localizações dos sensores.

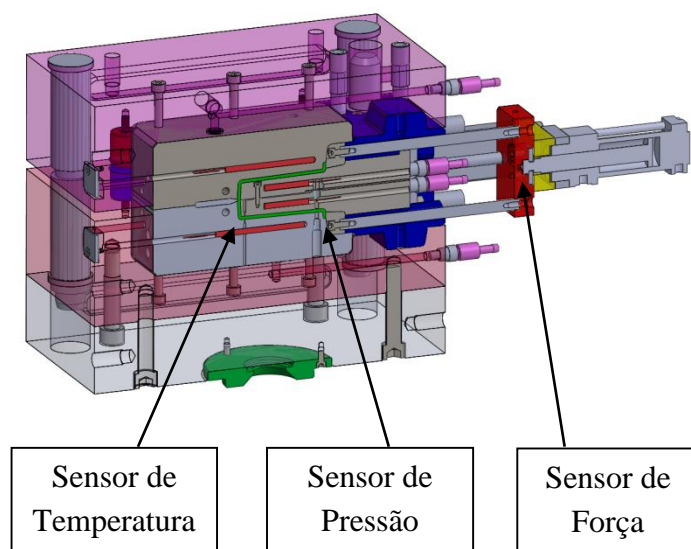


Figura 9-6 – Localização dos sensores.

Os dados retirados servirão para trabalhos futuros de previsão de processos semelhantes. Os dados de todo o ciclo serão registados para que se possa formular uma melhor aproximação teórica, dando origem a uma curva representativa de todo o processo.

## 10. SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO

Para confirmar alguns dos parâmetros do otimizador procedeu-se à simulação de enchimento do molde em estudo. Esta análise foi efetuada utilizando a ferramenta comercial *Moldflow*. O estudo reológico foi efetuado com a peça totalmente formada em matéria plástica e serviu para fornecer mais informações acerca do processo de enchimento, antes de se proceder à concretização do molde. O estudo foi efetuado com o sistema de refrigeração para que os resultados fossem mais fiéis. O procedimento para este tipo de simulação foi o comum para uma análise efetuado pelo método dos elementos finitos. O *solver* utilizado foi o *Mid-plane*, ou seja a aplicação gerou uma superfície intermédia das geometrias importadas sobre a qual aplicou os elementos finitos. Para a peça em questão é uma análise bastante precisa uma vez que se tratará de uma geometria bastante simples. Foi efetuada ainda uma análise de integridade dos elementos triangulares antes de criar o *Mesh*, para garantir que as superfícies estavam todas em boas condições de serem tratadas pela aplicação. A Figura 10-1-A representa a peça preparada com os sistemas de refrigeração antes de se iniciar a simulação reológica.

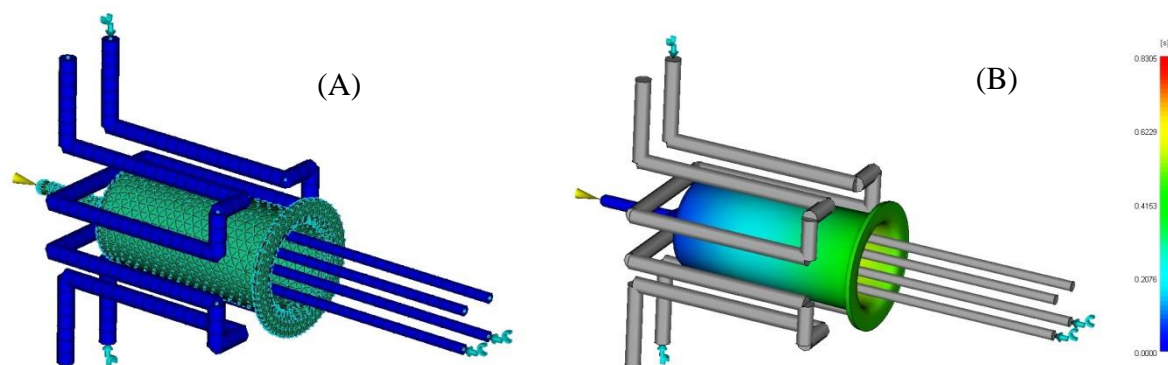


Figura 10-1 – Malha para simulação em *Moldflow* (A); Resultado do tempo de enchimento (B).

Foram efetuadas análise de enchimento, empacotamento, arrefecimento e empenos. As análises foram todas satisfatórias não tendo sido reportado pela aplicação nenhum impedimento ou anomalia ao processo. No entanto estes resultados apenas têm importância para analisar o escoamento do fluido e verificar se a peça enche totalmente, pois as condições de simulação são diferentes das encontradas no molde real. A Figura 10-1-B apresenta o resultado da análise efetuada à fase de enchimento. Pode-se verificar que não existe obstrução à passagem do fluido, pois a peça está totalmente cheia. A aplicação apresenta a peça completa e termina a fase de enchimento após 0.8 segundos, o que significa que não apresenta vazios, ou outros defeitos devido a um enchimento deficiente. Este valor serve ainda para utilizar no otimizador como ponto de aproximação à solução final.

## 11. CONCLUSÃO

Como pretendido procedeu-se a uma análise extensiva de vários algoritmos bio-inspirados, nas suas formas mono e multi-objetivo. Os resultados foram bastante satisfatórios, pois pela análise do código fonte, e pelos artigos publicados pelos autores, foi possível ao autor desta dissertação adquirir os conhecimentos necessários para proceder à programação do seu próprio algoritmo de otimização. Os algoritmos estudados foram aplicados com sucesso ao problema do ciclo de injeção com resultados bastante semelhantes para todos, inclusive o algoritmo PGA, programado pelo autor. Dos resultados obtidos não foi possível verificar um verdadeiro destaque de nenhum dos algoritmos, pois nenhum obteve o melhor resultado em todas as análises. De qualquer das formas o melhor tempo de todos foi obtido pelo algoritmo ABC, e os valores obtidos para as variáveis de projeto foram as utilizadas para a construção do molde de injeção. A facilidade com que os algoritmos chegaram aos resultados e a semelhança entre eles, pode-se dever ao facto de se tratar de um problema de otimização contínua, onde todas as variáveis são do tipo real, o que facilita bastante tanto o funcionamento do algoritmo como a sua programação. O algoritmo de otimização PGA foi programado com sucesso, pois analisando os resultados obtidos e comparando-os com os resultados obtidos pelos restantes algoritmos, é notória a sua semelhança. Na análise da convergência tanto o número de iterações para se atingir um valor perto do mínimo, como o valor mínimo atingido é muito semelhante ao resultado obtido pelos restantes algoritmos. O mesmo se verifica para os valores obtidos para as variáveis de projeto. Comprova-se então desta forma a eficácia e a veracidade dos resultados obtidos pelo PGA.

O problema estudado foi obtido pela adição de novas etapas ao ciclo de moldação, de forma a permitir o processamento dos preregs. As novas etapas permitiram a criação de uma nova formulação, juntando os estágios do processamento por injeção com os estágios de termoformação em apenas um processo, ou seja, utilizando apenas molde, o que significa uma grande redução de custos de processamento e de logística. Pelo estudo das tecnologias semelhantes, e da compatibilidade dos materiais a utilizar prevê-se que este processo tem possibilidades de ser bem-sucedido, ainda que apenas os testes reais poderão confirmar a veracidade destas previsões. Foi projetado um molde recorrendo às melhores práticas descritas pelo manual do projetista, apenas diferindo nas dimensões fornecidas pelas variáveis de projeto resultantes da otimização. Com vista a trabalhos futuros, o molde projetado não só permite verificar a eficácia do processo de sobre-moldação como ainda permite verificar a formulação efetuada e registar as forças de extração necessárias para extrair a peça. Os resultados da simulação de enchimento permitem concluir que os resultados provenientes da otimização garantem o bom funcionamento do molde e que este tem a capacidade de injetar a peça por completo sem defeitos de enchimento.

## 12. TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros dividem-se em dois grupos, um 1º relacionado com a otimização e o um 2º relacionado com os moldes e injeção de polímeros.

Em otimização pretende-se continuar com o aperfeiçoamento do algoritmo mono-objetivo programado durante esta dissertação, adicionando novos métodos de pesquisa, introduzindo modificações nos operadores e a sua utilização em problemas de otimização discreta.

É pretendido ainda a programação de um algoritmo multi-objetivo, também genético, para que se tenha total acesso ao código e desta forma moldar o algoritmo ao problema tecnológico em questão.

Na aproximação às variáveis de projeto, pretende-se implementar os métodos de redes neuronais e de lógica difusa, que têm sido aplicados com sucesso em problemas de engenharia. Desta forma pretende-se iniciar as variáveis de projeto não por valores normalmente utilizados pelas melhores práticas, mas por soluções encontradas por estes métodos, não impondo restrições na busca.

Na área dos moldes e da injeção de polímeros é pretendido construir o molde projetado durante esta dissertação. O molde será utilizado para obter peças por sobre-moldação dos tecidos pré impregnados, comprovando a eficácia da junção das tecnologias de termoformação com injeção.

Os dados registados durante o processo, como temperatura, força e pressão, recorrendo aos sensores introduzidos no molde, servirão para confirmar a modelação efetuada do processo. Estes registos vão permitir ajustar a formulação das novas etapas para que se possam simular e prever trabalhos semelhantes.

O molde foi ainda projetado com a capacidade para obter as forças necessárias para a extração das peças moldadas. Desta forma é possível estabelecer uma relação entre as forças de extração e os parâmetros de processamento.

Pretende-se também determinar o atrito gerado entre o material metálico das buchas e a peça plástica. As contrações volumétricas que se registam durante o arrefecimento, e que originam as forças de contacto podem ser atenuadas devido aos tecidos prepregs, reduzindo desta forma o atrito entre as duas partes e reduzindo as forças necessárias de extração.

### 13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kazmer, D. (2007). *Injection Mold Design Engineering*. Hanser.
- Ashby, M., & Jonhson, K. (2002). *Materials and Design The art and science of materials selection in product design*. Massachusetts: Elsevier.
- Barrico, C. M. (2007). *Optimização Evolucionária Multi-Objectivo em Ambientes Incertos - Pesquisa de Soluções Robustas*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Coimbra.
- Basturk, B., & Karaboga, D. (May 12-14 de 2006). An Artificial Bee Colony Algorithm for Numeric function Optimization. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*. Indianapolis, Indiana, USA.
- Bayer. (2012). Obtido de Bayer Films: [http://www.bayerfilms.com/processing/film\\_insert.html](http://www.bayerfilms.com/processing/film_insert.html)
- Beaumont, J., Sherman, R., & Nagel, R. (2002). *Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation*. Cincinnati: Hanser.
- Budinski, K., & Budinski, K. (2005). *Engineering Materials Properties and Selection*. New Jersey : Pearson Prentice Hall.
- Carreira, P., Alves, N., Ramos, C., & Bártolo, P. (2013). Bio inspired algorithms for Injection Moulding Optimization. *Advanced Materials Research Vol. 683* pp 771-774.
- Carreira, P., Alves, N., Ramos, C., & Bártolo, P. (2013). Optimization of Thermoplastic Prepregs Overmoulding. *Applied Mechanics and Materials Vols. 365-366* pp 1007-1010, Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.365-366.1007, 201.
- Centimfe. (2003). *Manual do projetista para moldes de injeção de plásticos*.
- Coello, C., & Christiansen, A. (1999). A multiobjective optimization tool for engineering design. *Engineering optimization* 31(3), 337-368.
- Cormen, T., Leiserson, C., & Rivest, R. (1990). *Introducing to algorithms*. New Delphi: Prentice Hall.
- Costa, L. (2003). *Algoritmos Evolucionários em Optimização Uni e Multi-Objectivo*. Tese de Doutoramento, Ramo de Engenharia de Produção e Sistemas, Braga: Universidade do Minho.
- Crawford, R. (1998). *Plastic Engineering 3ª edição*. Butterworth Heinemann.
- D., K. (2007). *Injection Mold Design Engineering*. Hanser.
- Deb, K. (1995). *Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples*. New Delphi: Prentice-Hall.

- Deb, K. (1999). *Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problems*. Evolutionary Computation Journal 7(3), 205-230.
- Deb, K. (2000). *An efficient constraint handling method for genetic algorithms*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Deb, K., & Goldberg, D. (1995). A comparison of selection schemes used in genetic algorithms Foundations of Genetic Algorithms. G. J. E. Rawlins, pp. 69-93,1991.
- Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Italy: PhD thesis, Politecnico di Milano.
- DSM. (2000). Designing for performance and value. DSM engineering plastics.
- Elsass, M. (Fevereiro de 2012). Obtido de Get Better at Multi-Material Molding: <https://www.plasticstechnology.com/articles/get-better-at-multi-material-molding>
- Ferreira, I., Weck, O. d., Saraiva, P., & Cabral, J. (2009). Multidisciplinary optimization of injection molding systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41: 621 - 635.
- Ferreira, I., Weck, O., Saraiva, P., & Cabral, J. (2009). Struct Multidisc Optim. *Multidisciplinary Optimization of Injection Molding Systems*, 621-635. Springer.
- Fogel, J. (1964). *On the Organization of Intellect*. Los Angeles: University of California.
- Fogel, L., Owens, A., & Walsh, M. (1966). *Artificial intelligence through simulated evolution*. John Wiley & Sons.
- Glover, F. (1986). *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*. Computers and Operations Research 13 (5), Elsevier, 533-549.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.
- Gonçalves, M. (2012). *Portal dos Moldes*. Obtido de Utilização de sistemas valvulados sequenciais para decoração de peças técnicas: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/sistemasvalvulados.asp>
- Goodship, V. (2004). *Practical guide to injection molding - Arburg. A*.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Jenkins, W. (1991). Towards Structural Optimization Via the Genetic Algorithm. Computers & Structures.

- Jiménez, F., Verdegay, J.L., & Coméz-Skarmeta, A. (1999). Evolutionary techniques for constrained multiobjective optimization problems. *Proceedings of the workshop on Multi-Criterion Optimization Using Evolutionary Methods*, 115-116.
- Karaboga, D., & Akay, B. (2009). A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. Melikgazi, 38039 Kayseri, Turkey: Erciyes University, The Department of Computer Engineering.
- Karaboga, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. Technical report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). Artificial Bee Colony Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems. Erciyes University, Engineering Faculty, The Department of Computer Engineering.
- Kennedy, J., & Eberhart, J. (1995). *Particle swarm optimization*. *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. Piscataway, NJ, pp. 1942–1948.: IEEE Service Center.
- Knights, M. (December de 2003). *Ultimate Control for the Toughest Molding Jobs*. (Plastics Technology ) Obtido de Sequential Valve Gating: <https://www.plasticstechnology.com/articles/sequential-valve-gating>
- Kurtz. (2012). Obtido de Inmold Decoration (IMD): <http://www.kurz.de/en/>
- Laminates, B. (2012). *Tepex superior in motion*. Obtido de Bond Laminates: <http://www.bond-laminates.com/en/>
- Love, J., & Goodship, V. (2002). *Multi-Material Injection Moulding*. Smithers Rapra Press.
- Menges, G., Walter, M., & Mohren, P. (2001). *How to Make Injection Molds*. Cincinnati: Hanser.
- Michalewicz, Z., & Janikow, C. (1991). *Handling constraints in genetic algorithms*. *Proceedings of the fourth International -conference on Genetic Algorithms* pp.151-157.
- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Boston: Kluwer.
- Müller, G. (2012). Obtido de Müller Wallau: <http://www.mueller-wallau.de>
- Nakrani, S., & Tovey, C. (2004). On Honey Bees and Dynamic Server Allocation in Internet Hosting Centers. *Adaptive behavior* 12, 223-240.
- Nash, S., & Sofer, A. (1996). *Linear and nonlinear programming*. New York: McGraw-Hill International Editions.
- Nocedal, J., & Wright, S. (1999). *Numerical optimization*. New York: Springer-Verlag.

- Pham, D., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, m. (2005). *The bees algorithm*. Technical Note: Manufacturing Engineering Center, Cardiff University.
- Pitts, W., & McCulloch, W. (1943). *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*. Bulletin of Mathematical Biophysics Vol 5, pp 115–133.
- Ramos, C., Carreira, P., Alves, N., & Bártolo, P. (2012). Optimal-mould - part II: Global optimization of the injection moulding cycle time. Proceedings of the 10th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Editor(s): Theodore E. Simos, et al., Vol. 1479, pp. 1574-1578, American Institute of Physics, (ISBN: 978-0-7354-1091-6).
- Rao, S. (1984). *Optimization: Theory and applications*. New York: Wiley.
- Rechenberg, I. (1964). *Cybernetic solution path of an experimental problem*. Royal Aircraft Establishment, Farnborough, England: Library Translation N° 1122.
- Rechenberg, I. (1973). *Evolutionsstrategie: optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution*. Frommann-Holzboog Verlag.
- Reeves, C. (1995). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. McGraw-Hill International.
- Reklaitis, G., Ravindran, A., & Ragsdell, K.M. (1983). *Engineering optimization methods and applications*. New York: Wiley.
- Rosato, D., Dominick V., Donald V., & Rosato, Ma. (2001). *Injection molding handbook*. Springer.
- Sawaragi, Y., Nakayama, H., & Tanino, T. (1985). *Theory of multiobjective optimization*. Academic Press.
- Shappe. (2012). *TPFL preregs*. Obtido de <http://www.schappe.com/>
- Shi, Y., & Eberhart, R. (1998). Parameter selection in particle swarm optimization. *Annual Conference Evolutionary Programming*. San Diego.
- Silva, J. (2005). PRÉ-IMPREGNADOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA: FABRICO E TRANSFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO A QUENTE E ENROLAMENTO FILAMENTAR. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade do Porto ). Faculdade de Engenharia do Porto.
- Smith, W. (1998). *Princípios de ciência e engenharia dos materiais*. Lisboa: McGraw-Hill de Portugal.
- Summerer. (2009). *Summerer Technologies*. Obtido de <http://www.summerer.de/de/index.htm>
- Tim, A., Turng, L., & Gramann, P. (2008). *Injection Molding Handbook*. Hanser Verlag.
- Turing, A. (1948). *Intelligent Machinery*. National Physical Laboratory, technical report.

- Yang, X. (2008). *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications-Firefly algorithms for multimodal optimization*. Lecture Notes in Computer Sciences, Vol. 5792, pp. 169-178, SAGA.
- Yang, X. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*. Lecture Notes in Computer Sciences, Vol. 5792, pp. 169-178.
- Yang, X. (2010). *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010): A new metaheuristic bat-inspired algorithm*. Springer, SCI 284, 65-74.
- Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Luniver Press, UK.
- Yang, X. S. (2011). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Luniver Press.
- Yang, X. S. (2011). Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation. *Int. J. Bio-Inspired Computation*, Vol. 2, No. 2, pp.78–84.
- Yang, X., & Deb, S. (2009). *Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBic 2009): Cuckoo search via Lévy flights*. USA: IEEE Publications-pp. 210-214.
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1999). *Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 3, no. 4, 257{271.

## **14. ANEXOS**

### 14.1. Anexo 1 – Soluções do problema multi-objetivo.

Quadro 14-1 – Soluções do problema multi-objetivo.

	$s_{gate}$	$d_{release}$	$d_{runner}$	$l_{gate}$	$l_{runner}$	$P_{inj}$	$T_{cool}$	$T_{demol}$	$T_{melt}$	$\Delta P$	$t_c$	$V_{feed}$
Sol. 1	0,003231	0,067643	0,004049	0,005278	0,022497	57,222852	296,306776	352,643086	496,955611	0,170641	76,941303	0,0379101
Sol. 2	0,003282	0,068658	0,004049	0,005165	0,020743	57,189858	296,338875	351,753831	497,019522	0,158037	77,159095	0,0355367
Sol. 3	0,003975	0,070666	0,004698	0,005419	0,020582	56,839838	296,131532	349,696340	505,537706	0,133273	79,003317	0,0482201
Sol. 4	0,003957	0,070157	0,004521	0,005657	0,020438	56,702713	296,144107	351,362010	503,125524	0,138259	78,471334	0,0461188
Sol. 5	0,006909	0,072517	0,006999	0,005888	0,020056	56,590014	295,973899	338,878449	507,685942	0,083282	88,001212	0,1104659
Sol. 6	0,006853	0,072269	0,006995	0,006810	0,020091	56,629755	295,987202	340,065825	506,272020	0,084884	87,803213	0,1174773
Sol. 7	0,003478	0,070231	0,005290	0,005274	0,020324	57,155127	296,282347	351,020818	497,469816	0,119116	77,941061	0,0545700
Sol. 8	0,003647	0,067643	0,004049	0,005278	0,020544	57,222852	296,306776	352,643318	496,957045	0,155228	77,296048	0,0370684
Sol. 9	0,004421	0,070482	0,006319	0,006033	0,020281	56,781244	296,011783	348,049540	499,436877	0,098725	80,326930	0,0808664
Sol. 10	0,004628	0,070672	0,005909	0,005364	0,020463	57,087317	296,270054	350,975364	499,330682	0,103873	79,487253	0,0716120
Sol. 11	0,005360	0,070780	0,006365	0,005747	0,020079	57,026345	296,038055	346,864216	501,328653	0,094036	81,893407	0,0853670
Sol. 12	0,003487	0,070624	0,004399	0,005322	0,021395	56,986312	296,190091	350,459283	497,010841	0,149158	77,749901	0,0426055
Sol. 13	0,003307	0,067643	0,004049	0,005278	0,021596	57,222852	296,306776	352,643041	496,956082	0,164076	77,003105	0,0370440
Sol. 14	0,006399	0,074191	0,006866	0,007812	0,020552	56,954195	296,040296	351,117887	503,108189	0,090531	83,423498	0,1203443
	[ m ]	[ m ]	[ m ]	[ m ]	[ m ]	[MPa]	[ K ]	[ K ]	[ K ]	[MPa]	[s]	$\times 10^{-5} [m^3]$