



**Universidade de  
Aveiro  
Ano 2012**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Nuno Vicente  
Pereira Gonçalves**

**Ferramentas moldantes para obtenção de sistemas  
bi-material**





**Universidade de  
Aveiro**  
Ano 2012

Departamento de Engenharia Mecânica

**Nuno Vicente  
Pereira Gonçalves**

**Ferramentas moldantes para obtenção de sistemas  
bi-material**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho à minha família pelo apoio prestado ao longo dos tempos, que me permitiu ultrapassar todas as barreiras e alcançar os meus objetivos.



## **O júri**

### **Presidente**

Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

### **Arguente**

Doutor Joel Correia Oliveira Vasco  
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria. Instituto Politécnico de Leiria.

### **Orientadora**

Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia  
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.





## **Agradecimentos**

O meu agradecimento especial à Professora Doutora Mónica Oliveira pela disponibilidade e orientação prestadas. Os seus conhecimentos e aconselhamentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

O meu agradecimento à Senhora Engenheira Tatiana Zhiltsova pela ajuda prestada na aquisição de conhecimentos no âmbito do processo de obtenção de componentes por moldação por injeção, bem como no domínio do software de simulação AMI<sup>®</sup>.

A algumas pessoas, gostaria também de deixar o meu agradecimento, não só pelo seu contributo direto para o desenvolvimento deste trabalho, mas por ao longo dos tempos terem estado presentes no meu crescimento académico e intelectual.

Aos meus pais e irmão, bem como à minha família, que me ajudaram e me incentivaram, principalmente nos momentos difíceis.

À Carolina, que nestes últimos anos desempenhou um papel muito importante na minha vida.

Aos meus amigos de sempre, Hugo Carvalho, Eduardo Pereira, João Almeida, Rui Costa e Leonor Vidal que estiveram e estarão sempre presentes.

Ao Bernardo Portas, Ivo Bento, Sofia Almeida, Joana Antunes, João Cunha, Ricardo Marques, Gonçalo Pereira, Tiago Mendes e Andreia Migueis com quem convivo diariamente e que me incentivaram e apoiaram durante o desenvolvimento desta tese.

Um agradecimento também ao Tiago Quintanilha, Tiago Ribeiro, Carlos Resende e João Moura pelo companheirismo e trabalho de equipa demonstrado ao longo destes cinco anos de percurso.



## Palavras-chave

Moldes, moldação por injeção, sobremoldação, termoplástico, inserto cerâmico, simulação numérica, adesão, tensões residuais, contrações, deflexões, AMI<sup>®</sup>.

## Resumo

A indústria dos plásticos é atualmente uma das mais prósperas do mundo. O constante aparecimento de novos materiais permite a permanente evolução deste setor. Deste modo a moldação por injeção, bem como a sobremoldação tendem a acompanhar esta evolução.

A sobremoldação é uma técnica cada vez mais utilizada ao nível industrial, e que permite a obtenção de produtos mais versáteis, e com custos de produção inferiores. No entanto, esta técnica envolve um grande conhecimento ao nível dos materiais aplicados, bem como da sua interação.

Neste estudo foram analisados alguns problemas no âmbito da moldação sobre insertos por recurso a simulação numérica, de forma a perceber a influência de algumas variáveis na qualidade final das peças. Parâmetros de processamento, aquecimento de insertos e introdução de entalhes foram analisados permitindo compreender os fenómenos inerentes ao aparecimento de tensões residuais internas (induzidas pelo escoamento e térmicas), que em tanto contribuem para a qualidade e rigor dimensional do produto final.

A metodologia aplicada inclui a utilização de ferramentas DOE, onde se analisa a influência relativa de um conjunto de parâmetros no produto final.

Desta forma, o recurso a ferramentas computacionais de simulação numérica AMI<sup>®</sup> permitiu perceber quais as interfaces polímero/cerâmico mais interessantes para a produção do modelo em questão, bem como a aplicabilidade do mesmo.

Os resultados finais permitiram concluir que a interface cerâmico/polímero mais vantajosa é alumina/polímero amorfo (PSU), e que o aquecimento de insertos, nos casos analisados não se revela uma mais valia que compense os custos acrescidos ao processamento, no entanto a introdução de entalhes revela-se uma solução interessante na medida que contribui sobremaneira para garantir a estabilidade dimensional.



**Keywords**

Molds, injection molding, overmolding, thermoplastic, ceramic insert, numerical simulation, adhesion, residual stresses, shrinkage, deflections, AMI<sup>®</sup>.

**Abstract**

The plastics industry is one of the most prosperous in the world nowadays. The constant appearance of new materials enhances the continuous evolution of this sector. Injection moulding, as well as overmoulding, tends to follow this evolution. Overmoulding is an increasingly used technique at the industrial level, since enables the manufacturing of more versatile products at inferior production costs. However, this technique involves a profound knowledge about the applied materials and their interaction.

Some problems on the context of the insert moulding through the numerical simulation process were analysed in this study, in order to establish the influence of some variables in the final quality of the parts. The processing parameters, the insert heating and the grooves introduction were analysed, enabling to understand the inherent phenomena to the internal residual stress appearance (flow-induced and thermal), which contribute to the quality and dimensional accuracy intended on the final product.

The applied methodology includes the use of DOE tools, whereby the relative influence of a set of parameters in the final product is analyzed.

Thus, AMI<sup>®</sup> computational tools have allowed establish the most interesting polymer/ceramic interfaces for the production of the model as well as the limits of its applicability.

The results enabled to conclude that the most interesting polymer/ceramic interface is alumina/amorphous polymer.

The insert heating within the studies carried out do not imply an objective improvement of the overall warping results. This solutions does not compensate the increased production costs.

It should also be mentioned that the introduction of grooves contributes to a general improvement on the dimensional stability of the parts.



# Índice

Índice de figuras .....	iii
Índice de tabelas .....	vii
Lista de abreviaturas .....	ix
Lista de símbolos .....	xi
Capítulo 1 – Enquadramento do trabalho .....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Guia de Leitura .....	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Moldação por injeção.....	5
2.2. Moldação Multimaterial.....	6
2.2.1. Definição.....	6
2.2.2. Técnicas de processamento.....	7
2.2.2.1. Bi-injeção .....	8
2.2.2.2. Coinjeção .....	9
2.2.2.3. Técnica de Rotação.....	12
2.2.2.4. Técnica de transferência .....	13
2.2.2.5. Técnica <i>Core Back</i> .....	14
2.2.2.6. Moldação sobre insertos .....	15
2.2.2.7. <i>Lost-Core</i> .....	16
2.3. Desafios ao nível do desenvolvimento do produto .....	17
2.3.1. Adesão.....	17
2.3.2. Contração & Tensões.....	20
2.3.3. Empenos.....	20
2.3.4. Seleção de materiais.....	21
2.3.4.1. Termoplásticos .....	22
2.4. Simulação Numérica.....	27
2.5. Moldação sobre insertos - Estado da Arte .....	30
Capítulo 3 – Análise metodológica .....	35
3.1. Desenvolvimento do modelo .....	35

3.1.1.	Utilização de termoplásticos de elevado desempenho.....	36
3.1.2.	Utilização de cerâmicos em contacto direto com os fluídos	36
3.1.3.	<i>Design</i> e introdução de entalhes.....	37
3.2.	Modelação 3D .....	37
3.2.1.	CAD\CAE.....	37
3.2.2.	Modelos de estudo.....	39
3.3.	Estudos numéricos .....	41
3.3.1.	Análise de malhas e adequabilidade do domínio de cálculo.....	41
3.3.2.	Equipamentos e materiais.....	44
3.4.	Análise <i>DOE</i> .....	46
3.4.1.	Seleção de fatores.....	47
3.4.2.	Definição do estudo paramétrico.....	48
3.4.2.1.	Análise de Variância .....	52
Capítulo 4 - Resultados e discussão.....		59
4.1.	Importância dos parâmetros de processamento.....	59
4.2.	Deflexões.....	63
4.2.1.	Deflexões mínimas nas diferentes interfaces.....	65
4.2.2.	Aquecimento de insertos.....	71
4.2.3.	Deflexão em modelos com entalhes.....	79
4.3.	Contrações .....	81
4.3.1.	Contrações mínimas nas diferentes interfaces.....	82
4.3.2.	Contrações em modelos com aquecimento de insertos.....	85
4.3.3.	Contrações em modelos com entalhes.....	89
Capítulo 5 - Conclusões .....		93
5.1.	Trabalhos futuros .....	96
Bibliografia.....		97
Anexos.....		101



# Índice de figuras

Figura 1: Ciclo de moldação por injeção (adaptado de [5]).	5
Figura 2: Classificação dos processos de moldação por injeção de multicomponentes (adaptado de [7]).	7
Figura 3: Esquematização do processo simultâneo de moldação por bi-injeção (adaptado de [8]).	8
Figura 4: Secção transversal de uma estrutura “sanduíche” obtida através do processo de coinjeção (adaptado de [9]).	9
Figura 5: Esquematização do processo de coinjeção (adaptado de [9]).	9
Figura 6: Comparação da coinjeção através dos processos de injeção simultânea (à esquerda) e sequencial (à direita) (adaptado de [10]).	9
Figura 7: Variantes do processo da técnica de rotação (adaptado de [7]).	9
Figura 8: Princípios de funcionamento da técnica de rotação (adaptado de [3]).	13
Figura 9: Transferência de uma preforma através de um robot [10].	9
Figura 10: Esquematização da técnica <i>Core Back</i> (adaptado de [3]).	15
Figura 11: Detalhe do funcionamento do dispositivo móvel [12].	15
Figura 12: Comportamento na interface de fundidos com diferentes viscosidades (adaptado de [10]).	21
Figura 13: Microestrutura de polímeros: semicristalino (à esquerda) e amorfo (à direita) (adaptado de [14]).	23
Figura 14: Microestrutura de um polímero semicristalino (adaptado de [14]).	23
Figura 15: Classificação dos termoplásticos em termos comerciais (adaptado de [15]).	9
Figura 16: Unidades repetitivas de PSU (adaptado de [17]).	26
Figura 17: Unidades repetitivas de PEEK (adaptado de [17]).	27
Figura 18: Aplicação do processo de sobremoldação (moldação sobre insertos) através do Autodesk Moldflow Insight® (adaptado de [19]).	28
Figura 19: Componentes constituintes da chave de aparafusar (adaptado de [19]).	29
Figura 20: Simulação do enchimento dos componentes da chave de aparafusar através do Autodesk Moldflow Insight® (adaptado de [19]).	29
Figura 21: Sobremoldação do PBT num inserto de bronze (adaptado de [12]).	9
Figura 22: Influência das modificações ao longo do processo de produção (adaptado de [24]).	38
Figura 23: Esquematização do primeiro modelo de estudo com inserto e sem entalhes, com espessura de termoplástico variável entre 1 e 5 mm.	39
Figura 24: Exemplificação tridimensional do primeiro modelo de estudo com inserto e sem entalhes, com espessura de termoplástico variável entre 1 e 5 mm.	39
Figura 25: Esquematização do segundo modelo de estudo com inserto e entalhes com profundidade de 0.1 a 1 mm.	40
Figura 26: Exemplificação tridimensional em corte do termoplástico com entalhes de 0.1 a 1 mm correspondente ao terceiro modelo de estudo.	40
Figura 27: Exemplificação tridimensional em corte do inserto com entalhes de 0.1 a 1 mm correspondente ao terceiro modelo de estudo.	40

Figura 28: Exemplificação do sistema de alimentação de canais frios relativo ao primeiro modelo. ....	43
Figura 29: Exemplificação do sistema de alimentação de canais frios relativo ao segundo modelo. ....	43
Figura 30: Resultados de S/N para os diferentes níveis da temperatura do fundido. ....	50
Figura 31: Resultados de S/N para os diferentes níveis de tempo de enchimento. ....	50
Figura 32: Resultados de S/N para os diferentes níveis de pressão de compactação. ....	9
Figura 33: Resultados de S/N para os diferentes níveis de tempo de compactação. ....	51
Figura 34: Exemplo da vista frontal do modelo com espessura de termoplástico 3mm onde estão identificados os pontos escolhidos. ....	55
Figura 35: Vista lateral do modelo com espessura de termoplástico 3mm sem entalhes onde estão identificados os três planos equidistantes escolhidos. ....	55
Figura 36: Comparação entre duas das nove simulações correspondentes ao método de Taguchi onde se registaram os valores máximos e mínimos de deflexão. ....	56
Figura 37: Influência dos parâmetros de processamento para a interface Alumina/PSU e Alumina/PEEK (1mm). ....	60
Figura 38: Influência dos parâmetros de processamento para a interface Zircónia/PSU e Zircónia/PEEK (1mm). ....	60
Figura 39: Influência dos parâmetros de processamento para a interface Alumina/PSU e Alumina/PEEK (3mm). ....	61
Figura 40: Influência dos parâmetros de processamento para a interface Zircónia/PSU e Zircónia/PEEK (3mm). ....	61
Figura 41: Influência dos parâmetros de processamento para a interface Alumina/PSU e Alumina/PEEK (5mm). ....	62
Figura 42: Influência dos parâmetros de processamento para a interface Zircónia/PSU e Zircónia/PEEK (5mm). ....	62
Figura 43: Exemplo da deformação do modelo com inserto de alumina e espessura de PSU de 3mm com fator de escala 20. ....	64
Figura 44: Deflexões totais mínimas para modelos com 1mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia. ....	65
Figura 45: Deflexões totais mínimas para modelos com 2mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia. ....	66
Figura 46: Deflexões totais mínimas para modelos com 3mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia. ....	9
Figura 47: Deflexões totais mínimas para modelos com 4mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia. ....	67
Figura 48: Deflexões totais mínimas para modelos com 5mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia. ....	67
Figura 49: Deflexões totais mínimas do termoplástico PSU para modelos com inserto de alumina. ....	68
Figura 50: Deflexões totais mínimas do termoplástico PEEK para modelos com inserto de alumina. ....	68
Figura 51: Deflexões totais mínimas do termoplástico PSU para modelos com inserto de zircónia. ....	69

Figura 52: Deflexões totais mínimas do termoplástico PEEK para modelos com inserto de alumina.....	9
Figura 53: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PSU.....	71
Figura 54: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PEEK.....	72
Figura 55: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PSU.....	9
Figura 56: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PEEK.....	73
Figura 57: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PSU.....	73
Figura 58: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PEEK.....	74
Figura 59: Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 50°C, sobremoldado por PSU com 1mm de espessura.....	76
Figura 60: Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 200°C, sobremoldado por PSU com 1mm de espessura.....	76
Figura 61: Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 50°C, sobremoldado por PSU com 3mm de espessura.....	77
Figura 62: Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 200°C, sobremoldado por PSU com 3mm de espessura.....	77
Figura 63: Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 50°C, sobremoldado por PSU com 5mm de espessura.....	78
Figura 64: Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 200°C, sobremoldado por PSU com 5mm de espessura.....	78
Figura 65: Deflexão do modelo PSU/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm.....	79
Figura 66: Deflexão do modelo PEEK/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm.....	80
Figura 67: Exemplo da vista frontal do modelo com espessura de termoplástico 3mm onde estão identificados os pontos escolhidos.....	81
Figura 68: Vista lateral do modelo com espessura de termoplástico 3mm sem entalhes onde estão identificados os três planos equidistantes escolhidos.....	81
Figura 69: Contrações para modelos com 1mm de espessura de termoplástico.....	9
Figura 70: Contrações para modelos com 2mm de espessura de termoplástico.....	83
Figura 71: Contrações para modelos com 3mm de espessura de termoplástico.....	83
Figura 72: Contrações para modelos com 4mm de espessura de termoplástico.....	84
Figura 73: Contrações para modelos com 5mm de espessura de termoplástico.....	84
Figura 74: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na contração dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PSU.....	86
Figura 75: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na contração dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PEEK.....	86
Figura 76: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na contração dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PSU.....	87
Figura 77: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na contração dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PEEK.....	87

Figura 78: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na contração dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PSU.....	88
Figura 79: Influência do aquecimento dos insertos de alumina na contração dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PEEK. ....	88
Figura 80: Contração do modelo PSU/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm e sem entalhes. ....	90
Figura 81: Contração do modelo PEEK/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm e sem entalhes. ....	91

# Índice de tabelas

Tabela 1: Compatibilidade entre materiais poliméricos (adaptado de [10]).	19
Tabela 2: Estatísticas de malha relativas ao modelo de estudo com espessuras variáveis entre 1 e 5 mm com insertos sem introdução de entalhes.	41
Tabela 3: Estatísticas de malha relativas ao modelo de estudo com insertos e entalhes nos mesmos com profundidades entre 0.1 e 1mm.	42
Tabela 4: Dimensões dos sistemas de alimentação para as diversas espessuras dos modelos.	42
Tabela 5: Propriedades dos materiais referentes aos insertos (Alumina e Zircónia) e ao molde (P-20).	44
Tabela 6: Propriedades dos termoplásticos “PSU Mindel B-360: Solvay Advanced Polymers” e “VESTAPEEK 2000G: Evonik Degussa GmbH”.	45
Tabela 7: Especificações da máquina de injeção “Allrounder 220 S 17 tons 1.3 oz (18mm)”.	46
Tabela 8: Fatores utilizados e os seus respetivos níveis.	47
Tabela 9: Matriz ortogonal L9.	48
Tabela 10. Resultados de deflexão resultantes e S/N das simulações propostas pela matriz ortogonal L9.	48
Tabela 11. Tabela de respostas obtida através do rácio S/N.	50
Tabela 12. Combinação dos parâmetros ideias de processamento com vista a minimizar a deflexão.	52
Tabela 13: Tabela de Variância (ANOVA).	54
Tabela 14: Condições de processamento para os modelos com inserto.	57
Tabela 15: Condições de processamento para os modelos de 3mm de espessura de termoplástico e com inserto com entalhes de 0.1 a 1mm de profundidade.	57
Tabela 16: Lista de nós analisados nas simulações de deflexão mínimas com e sem aquecimento de insertos para as diferentes espessuras de termoplástico considerado.	101
Tabela 17: Lista de nós analisados para as simulações de deflexão nos modelos com entalhes.	102
Tabela 18: Lista de nós analisados para as simulações de contração nos modelos sem entalhes as diferentes espessuras de termoplástico considerado.	103
Tabela 19: Lista de nós analisados para as simulações de contração nos modelos com entalhes.	104



# Lista de abreviaturas

<b>ABS</b>	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
<b>ANOVA</b>	<i>Analysis of Variance</i>
<b>ASA</b>	Acrilonitrilo-estireno-éster acrílico
<b>CAD</b>	<i>Computer assisted design</i>
<b>CAE</b>	<i>Computer assisted engineering</i>
<b>CET</b>	Coefficiente de expansão térmica linear
<b>DOE</b>	<i>Design of experiments</i>
<b>EVA</b>	Etileno-acetato de vinilo
<b>HDPE</b>	Polietileno de alta densidade
<b>AMI</b>	<i>Autodesk Moldflow Insight</i>
<b>MDL</b>	<i>Moldflow Design Link</i>
<b>LDPE</b>	Polietileno de baixa densidade
<b>PA 6</b>	Poliamida 6 (policaprolactama)
<b>PA 66</b>	Poliamida 66 (Polihexametileno adipamida)
<b>PC</b>	Policarbonato
<b>PBT</b>	Poli(tereftalato de butileno)
<b>PET</b>	Poli(tereftalato de etileno)
<b>PEEK</b>	Polieteretercetona
<b>PMMA</b>	Poli(metacrilato de metilo) ou acrílico
<b>POM</b>	Poli(óxido de metileno) ou poliacetal
<b>PP</b>	Polipropileno
<b>PSU</b>	Polisulfona
<b>SAN</b>	Copolímero de estireno-acrilonitrilo

**TED** Termoplásticos de elevado desempenho

**TPU** Termoplástico Poliuretano



# Lista de símbolos

Abreviaturas		Unidades
$c_p$	Calor específico	J/kg°C
$E$	Módulo de elasticidade	MPa
$G$	Módulo ao corte	MPa
$T_{\text{molde}}$	Temperatura do molde	°C
$T_{\text{fundido}}$	Temperatura do fundido	°C
$k$	Condutividade	W/m°C
$\alpha$	Coeficiente de expansão térmica	1/°C
$\nu$	Coeficiente de <i>Poisson</i>	
$\rho$	Densidade	g/cm <sup>3</sup>



# Capítulo 1 – Enquadramento do trabalho

## 1.1. Introdução

Os polímeros são materiais de eleição para diversas aplicações industriais, possibilitando a obtenção de produtos que associam alta *performance* com baixos custos de produção. São também um grupo de materiais que detém diversas propriedades. Para muitas aplicações um único polímero pode não ser suficiente para satisfazer as necessidades de um dado produto. Deste modo, a associação de diferentes polímeros, ou de polímeros com outro tipo de materiais é necessária para obter certos requisitos.

As tecnologias de moldação multimaterial são processos efetivos para produzir produtos poliméricos com propriedades visuais distintas e apelativas, ergonómicas e de elevado desempenho. Apesar deste tipo de tecnologia ter sido desenvolvida há alguns anos, só recentemente tem sido aplicada no fabrico de materiais poliméricos, com o intuito de produzir produtos com maior qualidade e funcionalidade.

O processo foi inicialmente utilizado para moldar componentes do mesmo material com cores distintas. Mais tarde foram utilizados materiais termoplásticos com diferentes propriedades como forma de dar resposta a componentes de elevado desempenho, o que através da utilização de apenas um polímero não seria possível [1].

Estes materiais oferecem uma grande liberdade de *design* para diversas aplicações industriais, visto que podem tomar formas diversificadas através de diferentes processos. Para além disso existe uma vasta gama de materiais com propriedades e características distintas que podem ser utilizados. O seu baixo custo faz destes uma escolha favorável para diversas aplicações tendo como objetivo a substituição de componentes metálicos, entre outros. Os materiais termoplásticos são cerca de seis vezes mais leves do que o aço e não são suscetíveis à oxidação. Para além disso,

podem ser produzidos componentes com geometrias bastante complexas com baixos custos de produção através de processos completamente automatizados, tais como as tecnologias de moldação por injeção e extrusão. As vantagens dos polímeros providenciam tremenda flexibilidade e liberdade para *designs* apelativos, o que hoje em dia, no mercado é um fator tido em conta no que diz respeito a opções de compra [1].

Com o aparecimento dos polímeros de elevado desempenho, o seu uso aumentou drasticamente na indústria automóvel como meio de reduzir o peso dos veículos, diminuindo tanto os consumos como as emissões de dióxido de carbono (estima-se que a cada 10% de redução de peso de um veículo se consegue diminuir o consumo de combustível em 5 a 7%). Também em aplicações electrónicas, eléctricas e acessórios para transporte de água quente, entre outras, esta gama de polímeros passou a ser bastante utilizada [2].

A moldação por injeção de multimateriais plásticos tem enormes vantagens quando comparada com o simples processo de injeção por moldação visto que as propriedades de diferentes polímeros podem ser combinadas de forma a permitir a obtenção de um produto mais moderno e que responda melhor às expectativas e necessidades dos clientes.

Existem diversas técnicas de moldação por injeção de multimateriais. A escolha da técnica mais adequada para um dado componente depende de fatores como o volume de produção, os custos laborais, e a disponibilidade das máquinas.

Este tipo de processos está também a encontrar um caminho na indústria de cuidados de saúde. Permite incorporar, nos dispositivos, camadas *soft-touch*, mas também melhorar a aparência, ergonomia, e proporcionar aos produtos inúmeras funcionalidades, tais como, amortecimento de ruídos e vibrações, resistência a choques, e impermeabilização [3].

Assim, é possível a aplicação de técnicas de moldação multimaterial em instrumentos cirúrgicos e cateteres que requerem o contacto com tecidos e fluidos humanos, dispositivos de diagnóstico, ou até em aplicações farmacêuticas onde o transporte de medicamentos de forma limpa e descontaminada é uma necessidade [4].

A boa adesão entre materiais é uma das maiores preocupações quando se fala em processamento multimaterial. A adesão entre materiais pode ser obtida através de uma correta escolha dos mesmos, de um *design* apropriado, bem como do controlo dos parâmetros do processo [1].

As técnicas de moldação por injeção de multimateriais vão continuar a desenvolver-se e a tendência é que sejam cada vez mais utilizadas à medida que novos materiais vão surgindo na indústria, permitindo uma constante evolução na produção de diferentes produtos com variadíssimas características.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo deste trabalho prende-se com o desenvolvimento de metodologias para a análise e otimização de sistemas de moldação multimaterial, mais especificamente no que diz respeito à adesão entre materiais, níveis de deflexão, contração e aparecimento de tensões residuais nos mesmos. Deste modo, pretende-se perceber a influência de diversos parâmetros e variáveis de processo, bem como a possibilidade de conciliar diferentes tipos de materiais. Assim, serão objeto de estudo duas interfaces distintas: termoplástico amorfo/cerâmico e termoplástico semicristalino/cerâmico. As análises anteriormente referidas serão executadas através do *software* Autodesk Moldflow Insight® 2012.

## **1.3. Guia de Leitura**

Esta tese está organizada em cinco capítulos principais. No primeiro capítulo é feita uma breve descrição dos objetivos da tese, tendo em conta os desafios que lhe estão diretamente associados. O capítulo dois consiste numa revisão bibliográfica, onde são abordadas as ferramentas e processos inerentes à moldação por injeção e mais aprofundadamente no que diz respeito ao caso particular da moldação multimaterial. Para além disso, descrevem-se também as técnicas de moldação

multimaterial, bem como os desafios relacionados com a aplicação das mesmas. É feita uma breve descrição dos dois tipos de termoplásticos em análise, nomeadamente os termoplásticos amorfos e semicristalinos. Por fim apresenta-se a revisão do estado da arte respeitante à moldação sobre insertos, onde são relatados estudos de sobremoldação, bem como métodos para otimização dos parâmetros de processamento.

No capítulo três é descrita a análise metodológica aplicada, onde são explicadas todas as opções tomadas ao longo do desenvolvimento dos modelos através do *software* de modelação tridimensional (Dassault Systems Catia®), bem como, as diferentes simulações de moldação multimaterial executadas através do Autodesk Moldflow Insight®.

No capítulo quatro procede-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Por fim, no capítulo cinco podem ser vistas as principais conclusões retiradas, bem como algumas indicações para trabalhos futuros.

# Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

## 2.1. Moldação por injeção

A moldação por injeção é uma das técnicas de fabrico mais utilizadas no processamento de materiais plásticos. Portugal ocupa um lugar cimeiro, a nível mundial no âmbito da indústria de moldes para plásticos. Através da moldação por injeção é possível obter produtos em grandes quantidades e a baixo custo. Na figura 1 podem ser vistas as diferentes fases que compõe este processo.

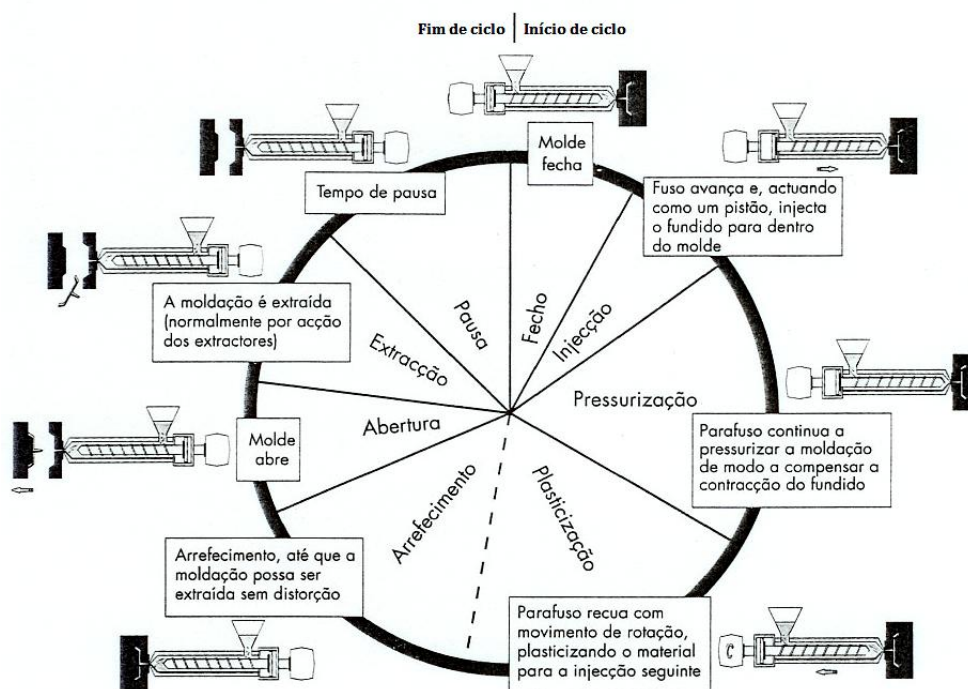


Figura 1: Ciclo de moldação por injeção (adaptado de [5]).

Durante o ciclo de injeção são originadas, nas peças moldadas, tensões residuais internas devido a inúmeras razões, nomeadamente: tensões induzidas pelo próprio escoamento do fundido; tensões resultantes das altas pressões impostas durante o

arrefecimento e solidificação do material plástico, sendo estas, responsáveis pela deformação e/ou empenos, bem como pela menor resistência mecânica das peças após a sua extração [5].

## **2.2. Moldação Multimaterial**

### **2.2.1. Definição**

A moldação multimaterial não é mais do que a moldação por injeção de materiais termoplásticos sobre um plástico, metal ou outro componente existente. É utilizada para tirar partido da junção de materiais com propriedades distintas, com a clara intenção de melhorar a sua funcionalidade. Quando o processo é executado corretamente, conseguem obter-se boas ligações químicas e físicas entre os materiais aplicados [6].

A utilização de técnicas de moldação multimaterial permite que através da ligação de dois materiais se possa conseguir uma maior versatilidade bem como a valorização de um dado produto. Esta particularidade é importante a nível industrial, onde as empresas estão constantemente à procura de utilizar técnicas inovadoras, para que possam superar os seus rivais. Deste modo é possível o fabrico de produtos com vantagens ao nível da segurança, ergonomia, funcionalidade e estética.

Apesar de estas técnicas terem aproximadamente três décadas, apenas recentemente foram expandidas. Durante os últimos anos a moldação multimaterial tem vindo a ser aplicada a um cada vez maior número de produtos devido aos avanços nas tecnologias e materiais, e à grande expansão de conhecimentos e recursos [1].

Embora as aplicações sejam infinitas e o valor que o produto adquire seja elevado, o processo torna-se bastante mais complicado do que uma simples moldação por injeção. Os custos são superiores, tal como o risco associado, e o tempo de desenvolvimento é maior. Estes motivos levam a que a moldação multimaterial seja por vezes posta de parte, devido às preocupações resultantes da complexidade desta técnica.



Para além disso, os efeitos relatados anteriormente para a moldação por injeção são ainda mais importantes no contexto da moldação multimaterial, visto que a interface resultante entre materiais, afeta o mecanismo de indução de tensões durante o processo, ou seja, as tensões tendem a agravar-se, essencialmente devido ao arrefecimento não uniforme e a restrições de contração impostas pelo subcomponente.

Por outro lado, existem também os problemas relativos à adesão entre os materiais, que caso não se verifique pode trazer graves problemas aos produtos produzidos, tais como, empenos, ruturas e fraturas.

### 2.2.2. Técnicas de processamento

Depois de conhecer o conceito geral de moldação multimaterial, existem diversas técnicas que podem ser aplicadas. O esquema representado na figura 2 mostra alguns dos tipos de processamento possíveis, e que serão abordados em detalhe.

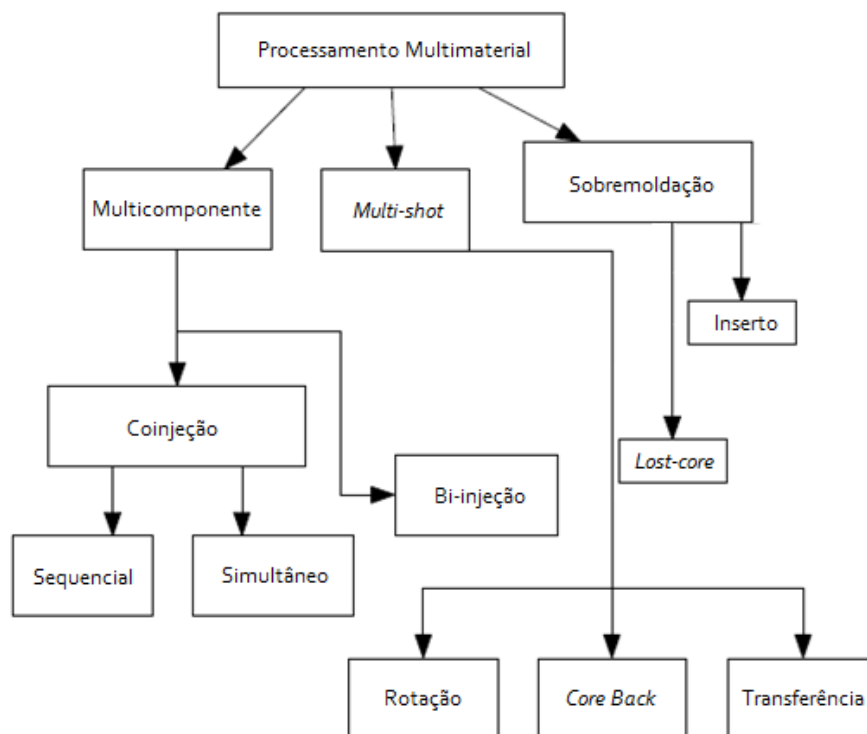


Figura 2: Classificação dos processos de moldação por injeção de multicomponentes (adaptado de [7]).

Dentro da moldação multimaterial, podem distinguir-se três grandes grupos: moldação multicomponente, *multi-shot* e sobremoldação.

No que diz respeito à moldação multicomponente, serão apresentadas duas técnicas, a coinjeção (simultânea e sequencial) e a bi-injeção. No caso da moldação *multi-shot* abordam-se as técnicas de rotação, *core back* e transferência. Por fim será definido o conceito de sobremoldação, mais precisamente, a moldação sobre insertos e *lost-core*.

### 2.2.2.1. Bi-injeção

O processo de bi-injeção representado na figura 3 é uma variante da moldação por injeção de multicomponentes. Os materiais são injetados simultaneamente para a cavidade moldante através de diferentes canais. A adesão entre ambos e a sua linha de soldadura é de caráter incontrolável. A dificuldade de repetibilidade do processo, mais concretamente das linhas de contacto entre materiais é inaceitável na maioria dos produtos e indústrias, pelo que este processo é pouco utilizado [7].

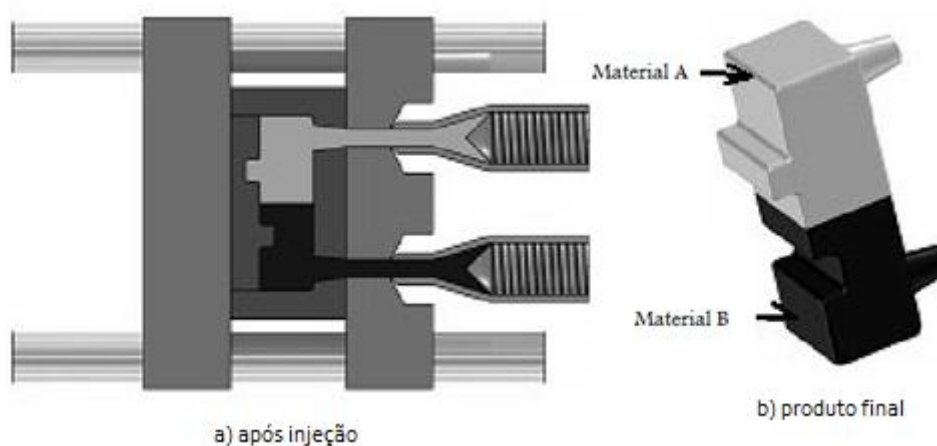


Figura 3: Esquematização do processo simultâneo de moldação por bi-injeção (adaptado de [8]).

### 2.2.2.2. Coinjeção

Esta técnica tem como vantagem a combinação das propriedades de dois ou mais materiais para produzir uma estrutura em forma de “sanduíche”. Para tal, é necessário executar várias injeções de forma sequencial para o mesmo molde, sendo que um dos materiais corresponde à camada exterior e o outro ao núcleo, como pode ser visto na figura 4.



Figura 4: Seção transversal de uma estrutura “sanduíche” obtida através do processo de coinjeção (adaptado de [9]).

Assim, dois polímeros compatíveis são injetados de forma sequencial ou simultânea para um molde formando uma estrutura em camadas. O primeiro material a ser injetado forma a camada exterior, enquanto o segundo compõe o núcleo.

Na figura 5 pode ser vista uma esquematização geral do processo de coinjeção [8].

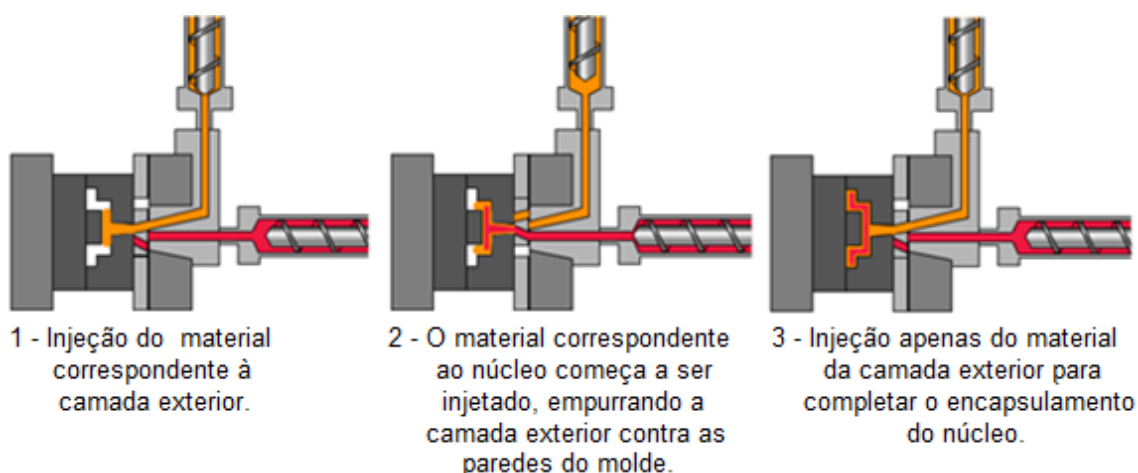


Figura 5 - Esquematização do processo de coinjeção (adaptado de [9]).

- **Injeção Sequencial (apenas um canal)**

Utiliza-se uma máquina de injeção com dois cilindros, um para o material da camada exterior e outro para o núcleo. Os polímeros são fundidos e de seguida injetados para o molde. Numa primeira fase, o polímero correspondente à camada exterior, e de seguida o material termoplástico correspondente ao núcleo. Através da utilização de uma válvula é possível que numa fase inicial apenas seja injetado para o molde o material correspondente à camada exterior. Após um ponto predefinido o escoamento é interrompido. Nesta altura inicia-se a injeção do segundo polímero. O tempo correspondente à mudança do material a injetar provoca uma diminuição da pressão no molde. Esta é a maior limitação deste método. Esta alteração de escoamento dos polímeros pode causar uma interrupção do escoamento, provocando defeitos na superfície da moldação [10].

Em termos da estrutura camada exterior/núcleo, tal como em todas as moldações por coinjeção, a alteração dos parâmetros de injeção, entre outros fatores, podem ser utilizados para controlar o comportamento dos materiais [10].

- **Injeção Simultânea (dois canais)**

À semelhança do processo de injeção sequencial, numa fase inicial, o polímero correspondente à camada exterior é injetado para o molde até um determinado tempo estabelecido. De seguida inicia-se a injeção do segundo polímero através de um canal diferente. Durante um determinado período, dá-se a injeção simultânea dos dois polímeros. O nome deste processo surge devido ao período em questão, e corresponde à grande diferença relativamente ao processo abordado anteriormente (injeção sequencial). A injeção do segundo material empurra a camada exterior contra a cavidade moldante onde esta arrefece e solidifica. A fase final do processo caracteriza-se apenas pela injeção do material correspondente ao núcleo, embora por vezes a moldação seja completada com uma camada exterior para concluir o encapsulamento do núcleo [10].

São usadas duas unidades de injeção neste método, às quais se junta um bico de injeção especialmente projetado.

A fase de injeção simultânea dos dois polímeros evita os problemas inerentes à injeção com apenas um canal, mantendo assim constante a velocidade de escoamento. Tal pode ser visto através da figura 6, comparando os perfis das pressões e velocidades do fuso de ambos os processos. No processo sequencial o período entre a injeção (A) e (B) pode ser visto de forma bastante clara, resultando numa descida da pressão na cavidade e um período onde não há movimento de material no fuso. Esta descida de pressão não acontece no caso do método simultâneo. Desta forma, são demonstradas algumas das limitações do processo de injeção sequencial abordadas anteriormente [10].

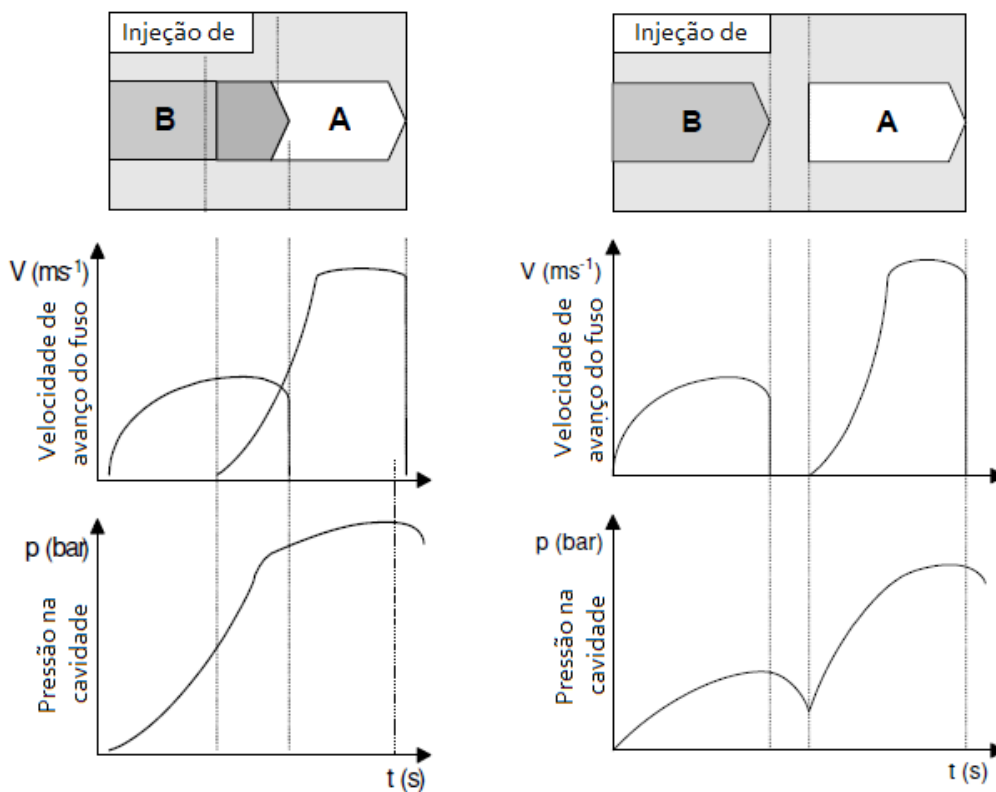


Figura 6: Comparação da coinjeção através dos processos de injeção simultânea (à esquerda) e sequencial (à direita) (adaptado de [10]).

### 2.2.2.3. Técnica de Rotação

A técnica de rotação (figura 7) é frequentemente aplicada no processo de sobremoldação. Hoje em dia foram estabelecidas diferentes variantes desta técnica que podem ser vistas na figura seguinte:

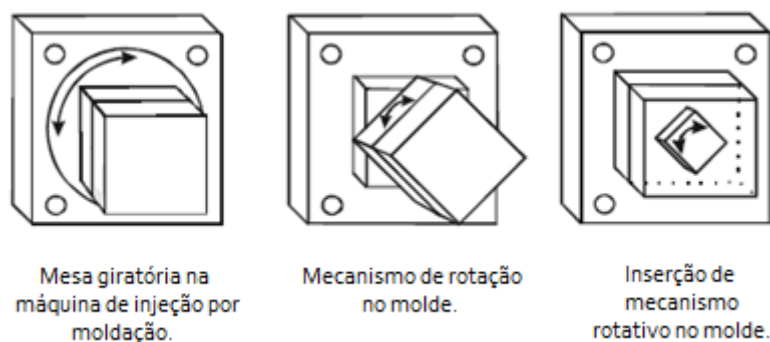


Figura 7: Variantes do processo da técnica de rotação (adaptado de [7]).

As diferentes variantes da técnica de rotação são baseadas nos mesmos princípios exemplificados na figura 7.

Durante cada ciclo, uma préforma (cavidade A) e uma sobremoldação (cavidade B) são simultaneamente produzidas. Após a abertura do molde a peça final sobremoldada (cavidade B) é extraída. A préforma (cavidade A) é transportada para a cavidade maior através do movimento de rotação do prato da máquina, onde vai ser posteriormente sobremoldada. O processo descrito anteriormente pode ser visto com maior detalhe na figura 8.

Em contraste com a técnica de transferência, neste caso, as préformas não são totalmente extraídas. Estas permanecem no molde que executa a rotação. Após o fecho do molde o ciclo repete-se [7].

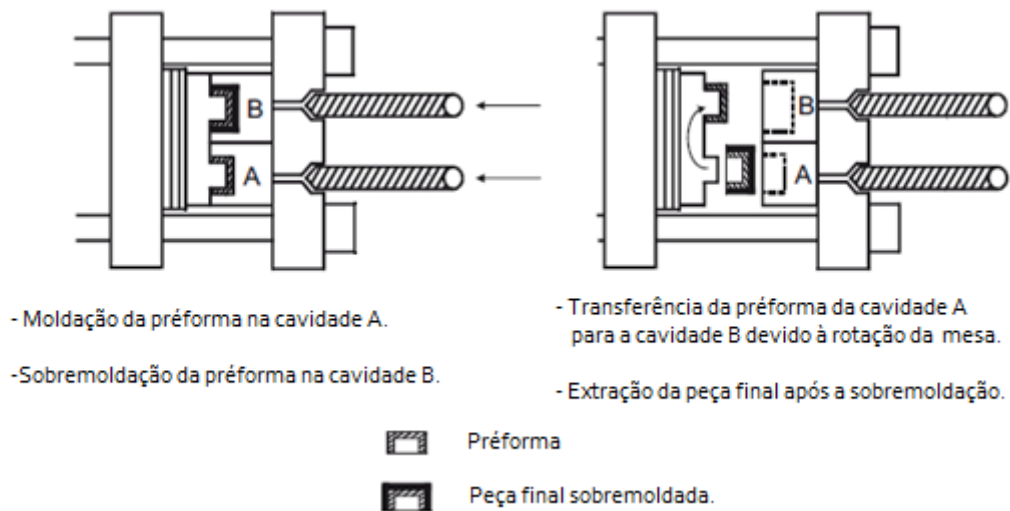


Figura 8: Princípios de funcionamento da técnica de rotação (adaptado de [3]).

#### 2.2.2.4. Técnica de transferência

Neste método, como alternativa à rotação da mesa, é usado um robot para transferir a préforma para a cavidade seguinte onde esta será sobremoldada (figura 9).

Numa fase inicial é injetado o primeiro material. De seguida o molde é aberto e um robot ou um operário transfere a préforma para uma cavidade diferente, onde esta é sobremoldada.

Tal como no método de rotação, é necessária uma boa ligação entre materiais, garantindo no entanto a separação entre os mesmos. É necessária também alta precisão na colocação das préformas nas devidas cavidades, para permitir assim que o produto tenha a qualidade pretendida, e esteja de acordo com as tolerâncias do projeto.

As préformas não têm de ser necessariamente transferidas para diferentes cavidades no mesmo molde, ou seja, os *robots* podem ser usados para transferi-las para uma máquina de injeção diferente onde se dá a sobremoldação. No entanto, para tal é necessário o investimento em duas máquinas de injeção. No caso de se pretender um produto com múltiplas camadas, a utilização de duas máquinas poderá ser bastante interessante. Por exemplo, num produto em que se pretendem obter quatro

camadas, podem injetar-se duas na primeira máquina, transferir a moldação através do robot para a segunda máquina, e aí produzir as duas camadas restantes.

A utilização de robots permite a redução dos tempos de ciclo e assegura a inexistência de riscos ou estragos no componente durante as transferências de cavidade ou máquina [10].

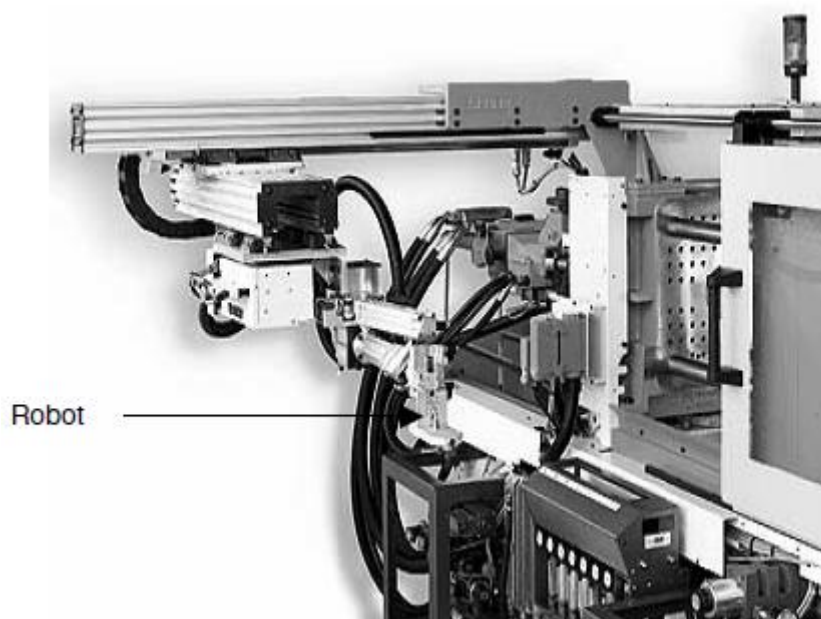


Figura 9: Transferência de uma preforma através de um *robot* [10].

#### 2.2.2.5. Técnica *Core Back*

Em contraste com as técnicas de transferência e rotação, na técnica “*core back*” o molde permanece fechado durante todo o ciclo (figura 10). Após a injeção do primeiro material o dispositivo móvel desloca-se (figura 11), deixando assim aberta a cavidade para que seja injetado o segundo componente. A introdução deste tipo de dispositivos tem como desvantagem o aumento do custo da ferramenta moldante.

A complexidade das partes é limitada pois as préformas não são extraídas, mas sim libertadas parcialmente. Este processo compreende longos tempos de ciclo [7].



Geralmente, as técnicas *core back*, transferência e rotação são processos escolhidos quando o volume de produções anuais é elevado [10].

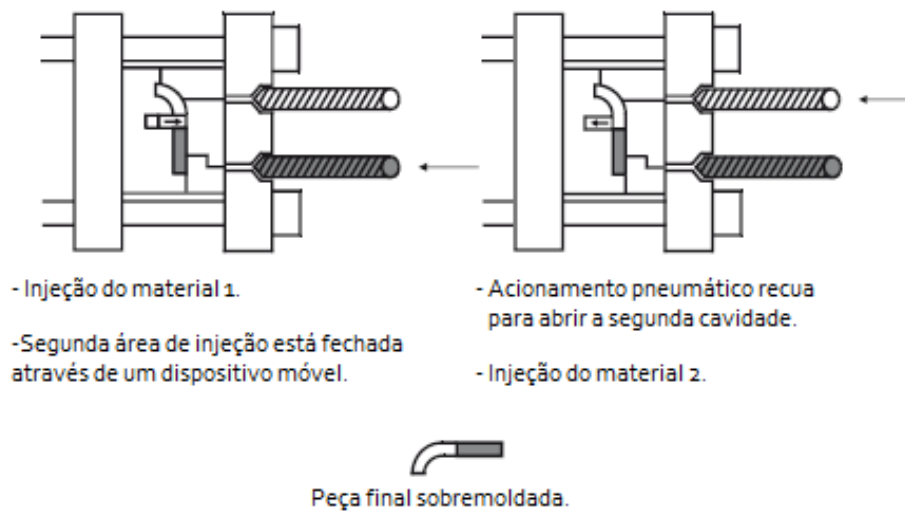


Figura 10: Esquematização da técnica *Core Back* (adaptado de [3]).

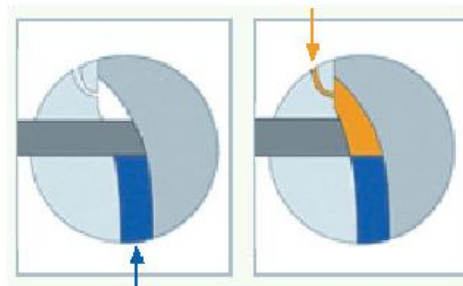


Figura 11: Detalhe do funcionamento do dispositivo móvel [12].

### 2.2.2.6. Moldação sobre insertos

A injeção de plásticos sobre insertos é um processo que compreende dois passos. Inicialmente um primeiro componente (inserto) é colocado dentro da cavidade moldante. De seguida é injetado sobre este um segundo material, tal como nos métodos tradicionais de injeção. Este processo não é limitado a apenas dois tipos de materiais, ou seja, a resultante das moldações pode ser sucessivamente transferida de modo a adquirir o número de camadas desejadas.

No caso de o inserto que se pretende utilizar ser constituído por um material polimérico, este apenas deve ser inserido na cavidade moldante após a sua produção e consequente arrefecimento. Isto significa que os insertos utilizados, podem inclusivamente ser adquiridos a um fornecedor, para posterior sobremoldação. É frequente a utilização de insertos metálicos.

Os insertos podem ser obtidos através de um qualquer processo de moldação por injeção, conformação de metais ou mesmo maquinagem [8]. Estes podem ser transferidos manualmente ou através do auxílio de *robots*. A dimensão dos insertos deve ser calculada com precisão, tal como o seu posicionamento na cavidade moldante de modo a prevenir possíveis danos da ferramenta.

O facto de a sobremoldação ser executada após a produção do inserto, quando este já se encontra à temperatura ambiente implica que em muitos casos se proceda ao aquecimento do mesmo antes de ser sobremoldado, como forma de garantir uma melhor adesão entre materiais [10].

Geralmente, a moldação sobre insertos é um processo escolhido quando o volume de produções anuais é baixo.

#### **2.2.2.7. *Lost-Core***

A técnica *lost core*, tal como a moldação sobre insertos é muitas vezes utilizada em combinação com metais e plásticos. Através desta técnica, é possível a produção de componentes ocos, como por exemplo, através da técnica de extrusão. Assim, é possível obter alta precisão dimensional, o que não acontece no processo anteriormente referido. Por outro lado, permite a obtenção de superfícies com boa definição interior.

Para a produção de componentes plásticos, um inserto é numa primeira fase produzido, tanto por ligas metálicas com baixo ponto de fusão, como por materiais plásticos solúveis. Depois da sua produção, é colocado no molde por via manual ou através da utilização de *robots*. De seguida é sobremoldado.

Após a sobremoldação, o inserto pode ser derretido ou dissolvido e o componente final pode ser limpo.

Apesar de permitir a produção de componentes com geometrias complexas e com elevada qualidade superficial, esta técnica implica um elevado custo por unidade fabrico, visto que os materiais para a produção dos insertos são caros e o processo implica longos tempos de desenvolvimento [10].

## **2.3. Desafios ao nível do desenvolvimento do produto**

### **2.3.1. Adesão**

Todas as técnicas de moldação multimaterial têm como objetivo a promoção de contacto adesivo entre os materiais utilizados num dado processo.

A ligação entre diferentes materiais utilizados no fabrico de componentes multimaterial por moldação através de injeção pode constituir um enorme desafio.

Especialmente nos processos de sobremoldação em que o segundo material é injetado para a cavidade moldante quando o primeiro componente já se encontra solidificado [6]. Como tal, na seleção de combinações de materiais para moldação multimaterial devem ser tomadas em consideração as propriedades pretendidas para o produto final. Em muitos casos, deve existir um certo nível de adesão entre o material do núcleo e o exterior, para que seja possível manter a integridade mecânica. Isto pode ser conseguido de duas formas:

1. Os materiais são compatíveis e oferecem alguma ligação na sua interface;
2. É necessário encontrar um método mecânico de ligação, como por exemplo a utilização de entalhes. Nos casos da sobremoldação e *multi-shot* isto pode ser feito através da utilização inteligente das propriedades dos materiais e do *design* da ferramenta.

Nem todos os componentes requerem adesão. Existem mesmo certos casos em que o objetivo é exatamente o oposto. Se o objetivo for a produção de articulações é necessário que as moldações se movam livremente na sua interface. Por exemplo na sobremoldação para produzir o que serão os braços e as pernas móveis de uma boneca. Nestes casos, os materiais devem ser selecionados tendo em conta a sua imiscibilidade para garantir zonas de movimento suaves. Nos casos em que é necessária uma boa adesão, uma boa força de ligação na interface é um pré-requisito. Para obter uma boa adesão, é necessário um certo nível de interdifusão entre os fundidos, algo que pode ser conseguido quando existe uma elevada compatibilidade ou solubilidade entre os mesmos [10].

No caso dos materiais termoplásticos, algumas combinações têm ligação melhor do que outras. Na tabela 1 pode observar-se a compatibilidade entre alguns dos materiais poliméricos mais utilizados. Os fornecedores de materiais deste tipo, tal como os de máquinas industriais, fornecem geralmente, um guia relativo à seleção de materiais. No entanto, deve ser referido que o comportamento de ligação pode ser afetado por diversos fatores, como por exemplo, as condições de processamento e o próprio *design* do componente em questão. Materiais de diferentes fabricantes, podem comportar-se de forma diferente, e gamas diferentes do mesmo material, podem também afetar as condições de ligação [6].

Podem ser utilizados aditivos para permitir uma maior compatibilidade entre materiais. A estes aditivos dá-se o nome de compatibilizadores. Através da utilização dos mesmos é possível obter ligação química em materiais não aderentes. Estas substâncias contêm normalmente um terceiro polímero que faz a ligação ou é solúvel nos dois materiais. Existem inúmeros compatibilizadores disponíveis comercialmente para fazer a ligação entre materiais imiscíveis, embora o seu custo seja elevado [10].

Usualmente, os materiais são escolhidos especificamente para que haja ligação entre ambos, utilizando o calor da injeção do segundo material para desenvolver essa ligação. Deste modo é dispensável o uso de técnicas de adesão, ou a montagem de componentes finais. Assim, é possível obter componentes multimaterial robustos com uma elevada qualidade final. [8]

Quando se desenvolve um componente para ser sujeito a sobremoldação, as espessuras do inserto ou da préforma devem ser o mais uniformes possível, para garantir uma ligação ainda mais robusta.

Devem evitar-se cantos afiados, bem como grandes diferenças de espessura em cada componente, para prevenir problemas de escoamento durante a injeção.

Um componente multimaterial tem um tempo de arrefecimento superior a uma simples moldação por injeção, e os sistemas de arrefecimento são menos efetivos neste caso. O inserto atua como um isolador e a extração de calor é menos eficiente. No entanto, a otimização do sistema de arrefecimento pode ajudar a reduzir o tempo de ciclo [8].

Quando não é possível obter boas ligações entre materiais, pode recorrer-se à geometria entre as partes moldadas como forma de o conseguir. Através da utilização de entalhes ou texturizações é possível garantir que os materiais não se separem, mesmo que sujeitos a utilizações extremas [10].

Tabela 1: Compatibilidade entre materiais poliméricos (adaptado de [10]).

	ABS	ASA	EVA	PA 6	PA 66	PBT	PC	HDPE	LDPE	PET	PMMA	POM	PP	PPO mod	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	+	+		+	+	+	+	-	-	+			-	-	-	+	+

(-) : Sem adesão (\*) : Fraca adesão (+) : Boa adesão

### **2.3.2. Contração & Tensões**

Tal como a adesão, existem outras características dos materiais que devem ser tidas em consideração quando se utilizam os processos de moldação com materiais de diferentes famílias. A título de exemplo, referem-se os níveis de contração relativos e os valores dos coeficientes de expansão térmica, que devem ser cuidadosamente verificados, antes da seleção dos polímeros para uma determinada aplicação [10].

No que diz respeito ao processo de injeção sobre componentes metálicos, as contrações do polímero junto ao inserto originam tensões elevadas e aumentam o risco de rutura e empeno do componente plástico. Normalmente, o coeficiente de expansão térmica linear (CET) dos plásticos é superior ao dos metais, o que se traduz por um comportamento muito diferente ao nível das contrações em ambas as matérias primas. As falhas provocadas pelas tensões circunferenciais podem ocorrer em momentos distintos: durante a extração da peça, enquanto a mesma está em serviço ou sobre carga. A espessura da peça plástica junto ao inserto depende do tipo de plástico em questão e do diâmetro exterior do inserto, bem como do material que o compõe. É recomendável a escolha de polímeros com elevado grau de cristalinidade em detrimento de polímeros amorfos, mesmo que estes possuam baixas taxas de contração [11,12].

A formação de tensões residuais na moldação ocorre essencialmente devido a dois fatores, o arrefecimento, e as tensões durante o escoamento.

### **2.3.3. Empenos**

Os empenos no produto final são frequentemente causados por condições de processamento que originam tensões residuais assimétricas na espessura da moldação [13].

### 2.3.4. Seleção de materiais

Para uma correta seleção dos materiais, tendo em conta o seu processamento através das técnicas de moldação multimaterial, devem ser tidas em conta as secções 2.3.1. e 2.3.2.. No entanto, existem ainda outros fatores que não devem ser descurados.

Existem algumas limitações relacionadas com a variação das características de escoamento entre dois materiais. A reologia tem um papel importante no que diz respeito à interface entre os materiais. Por consequência a viscosidade dos materiais tem uma enorme importância, visto que afeta toda a dinâmica do processo, bem como a distribuição dos materiais e a interação entre os mesmos. Regra geral, e tendo em vista a obtenção da configuração “sanduíche”, entre os materiais, e uma camada exterior espessa e consistente, o material relativo à camada exterior deve ter a mesma, ou preferencialmente uma viscosidade ligeiramente inferior à do material do núcleo, no caso da coinjeção. Se a viscosidade do material exterior for muito elevada, o fundido do núcleo irá atravessá-lo, passando a fazer parte da camada exterior (figura 12). A distribuição do núcleo pode também ser controlada através de ajustamentos no que diz respeito à velocidade e tempo de injeção, temperaturas de fusão do polímero e temperatura do molde. No entanto é recomendável a utilização de temperaturas de moldação idênticas em ambos os materiais visto que estes são processados simultaneamente [10].

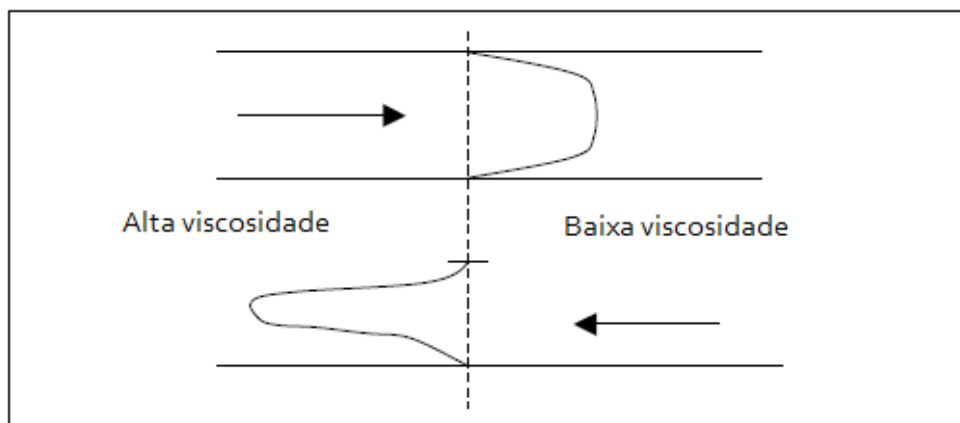


Figura 12: Comportamento na interface de fundidos com diferentes viscosidades (adaptado de [10]).

Por outro lado devem também ser tidas em consideração as propriedades dos vários materiais, que são utilizados na moldação multimaterial, especialmente, quando a moldação é para estar sobre tensão. As tensões podem ser produzidas durante a fase de processamento, especialmente se as condições de processamento forem inadequadas. Em serviço, quando submetidas a tensões mecânicas, ataques químicos ou altas temperaturas, estas podem aparecer nas moldações. Todos os parâmetros relativos ao *design* devem ser considerados, tanto como os valores de contração e expansão térmica linear (CET) [10]. Dependendo da aplicação, estes podem estar incluídos:

- Efeito tempo-temperatura: muitas propriedades são dependentes da temperatura. A rigidez, a ductilidade e a resistência ao impacto podem variar consideravelmente com a temperatura. Assim, devem ser efetuados testes tendo em conta as condições de serviço a que os componentes estarão sujeitos;
- Fadiga: a fadiga dinâmica pode ocorrer quando são aplicadas tensões periodicamente em aplicações, como por exemplo rolamentos;
- Exposição ao ambiente: os plásticos podem ser enfraquecidos devido à sua exposição à água, luz, temperatura e oxigénio, bem como a ataques químicos.

#### **2.3.4.1. Termoplásticos**

Estes materiais fundem e fluem quando aquecidos e solidificam quando arrefecidos. Se aquecidos subsequentemente estes têm a capacidade de fluir novamente. Isto significa que podem ser reprocessados e consequentemente reciclados através de uma segunda plasticização [10].

Quando os termoplásticos solidificam podem adquirir duas estruturas moleculares distintas: estrutura amorfa ou semicristalina (figura 13).



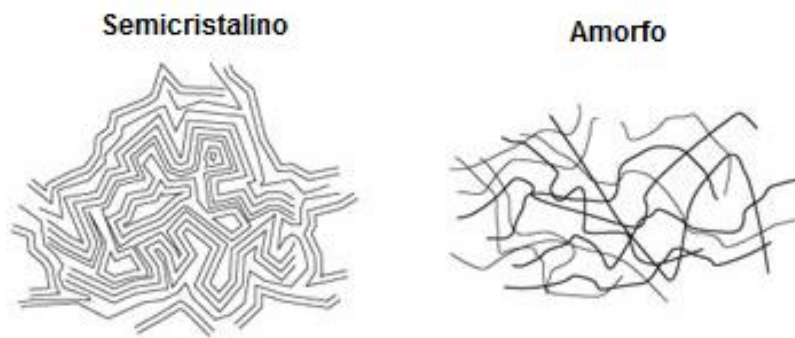


Figura 13 – Microestrutura de polímeros: semicristalino (à esquerda) e amorfo (à direita) (adaptado de [14]).

Os polímeros amorfos são materiais que não apresentam uma organização estruturada das respectivas cadeias moleculares.

De facto, a consistência do material depende fundamentalmente do grau de interação mecânica entre as cadeias moleculares, que se entrelaçam umas nas outras de uma forma aleatória.

Estes tipos de termoplásticos têm uma gama de temperaturas de serviço inferior à  $T_g$  (temperatura de transição vítrea) respetiva, por isso apresentam uma grande estabilidade dimensional, sendo relativamente pouco suscetíveis a fenómenos viscoelásticos [5].

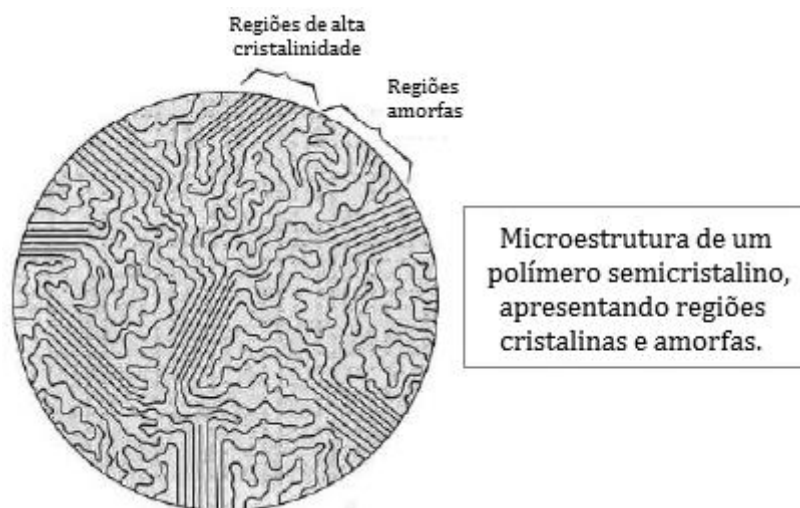


Figura 14 - Microestrutura de um polímero semicristalino (adaptado de [14]).

Os polímeros semicristalinos (figura 14) são bifásicos, combinando uma fase amorfa com zonas de estrutura molecular espacialmente muito ordenada, as cristalites.

Este tipo de polímeros, cuja gama de temperaturas de serviço deverá estar compreendida entre a  $T_g$  e  $T_f$  (temperatura de fusão) respetivas, são mais tenazes (devido à capacidade dissipativa da fase amorfa) e apresentam maior resistência química e ambiental (devido às forças de coesão intermoleculares associadas às estruturas cristalinas).

Um incremento da cristalinidade conduz a um aumento de densidade, rigidez, resistência à tração, temperatura de distorção e da resistência a solventes. Provoca uma diminuição da permeabilidade a gases e da resistência ao impacto.

De facto, como estes materiais combinam um esqueleto estrutural rígido (fase cristalina), com uma matriz amorfa de elevada deformabilidade (fase amorfa), apresentam um interessante compromisso de propriedades, embora muito dependente da gama de temperaturas de serviço [5].

As principais diferenças comportamentais entre os materiais amorfos e semicristalinos observadas durante a moldação por injeção são:

- **Fusão e solidificação** - Os termoplásticos amorfos exibem uma longa banda de temperatura, durante a qual passam do estado sólido para fundido, enquanto que, no caso dos termoplásticos semicristalinos a mudança de estados ocorre muito rapidamente, em pequenos intervalos de temperatura. Já em relação à solidificação, no caso dos termoplásticos amorfos o arrefecimento é lento e num intervalo largo de temperaturas, inversamente ao que acontece no caso dos termoplásticos semicristalinos, que rapidamente arrefecem numa estreita banda de temperaturas [10].
- **Contração** – Os termoplásticos amorfos apresentam baixos valores de contração quando solidificados, geralmente, entre 0.5% e 1%. Por sua vez, os termoplásticos semicristalinos, apresentam contrações na ordem dos 1.5% a 5%, dependendo do material em causa.

A maior contração verificada nos materiais semicristalinos, deve-se ao facto da repetição das unidades ao longo das cadeias moleculares ser de tal forma que estas se podem acomodar muito e de forma bastante ordenada.

Através da utilização de condições adequadas de moldação é possível variar a dimensão das áreas cristalinas. Quando um material semicristalino é moldado num molde aquecido, as taxas de arrefecimento são mais lentas, permitindo mais tempo às cadeias moleculares de se desembaraçarem e formarem zonas cristalinas. Como resultado, é possível obter uma maior proporção de material com zonas cristalinas, proporcionando assim ao produto uma maior força mecânica e estabilidade dimensional, mas com piores resultados ao nível da contração. Inversamente, no caso da utilização de moldes frios, o rápido arrefecimento do produto inibe a formação de zonas cristalinas, o que lhe proporciona menor contração, mas menor estabilidade dimensional e resistência mecânica.

Na figura 15, pode ser vista a classificação dos termoplásticos em termos comerciais.

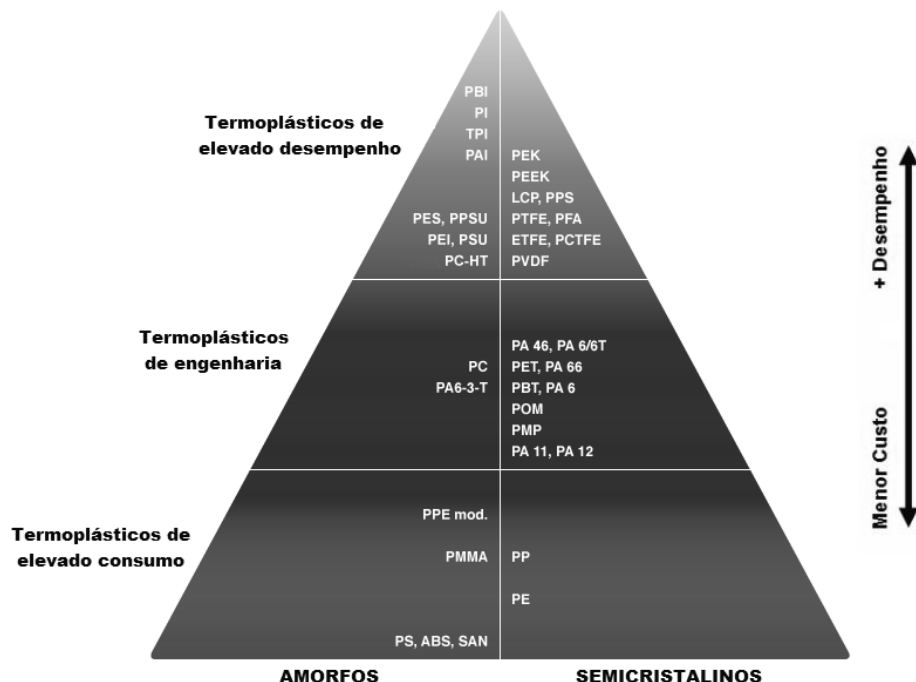


Figura 15 - Classificação dos termoplásticos em termos comerciais (adaptado de [15]).

#### 2.3.4.1.1. PSU

A polisulfona (PSU) é um termoplástico amorfo de elevado desempenho. É dimensionalmente bastante estável, rígido e extremamente resistente ao impacto. Possibilita também a obtenção de baixos níveis de contração [10]. A deformação deste tipo de polímeros numa vasta gama de temperaturas é reduzida, o que permite que sejam utilizados em tubos de água quente, peças instrumentais que tenham como requisito rigidez e resistência química, como por exemplo máquinas de lavar louça, interiores de eletrodomésticos, entre outros [16].

Em comparação com os termofixos de elevado desempenho, com os quais muitas vezes compete, a PSU, pode ser moldada por injeção, podendo-se assim obter um custo inferior, devido ao menor tempo necessário para a sua produção, visto que não necessita de tempo de cura [16].

Na figura 16 pode ser vista a unidade repetitiva da PSU.

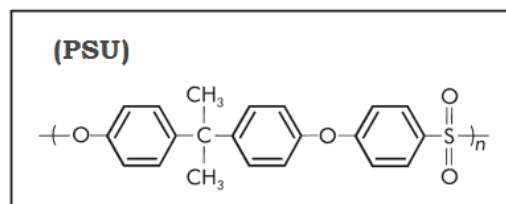


Figura 16 – Unidades repetitivas de PSU (adaptado de [17]).

#### 2.3.4.1.2. PEEK

A polieteretercetona (PEEK) é um polímero semicristalino de elevado desempenho e faz parte do grupo das Policetonas aromáticas.

Têm elevada resistência térmica, podendo suportar em serviço contínuo temperaturas de 250°C e picos de curta duração até 350°C.

Devido à sua elevada cristalinidade apresenta uma excelente combinação de propriedades mecânicas (em termos de resistência, rigidez, tenacidade e comportamento à fadiga) e elevada resistência química e às radiações [5].

Por outro lado possui um baixo coeficiente de expansão térmica (CET), tem pouca tendência para deformar e a sua absorção de água é reduzida.

Este tipo de termoplástico é normalmente utilizado para peças sujeitas a tensões mecânicas térmicas e elétricas, tais como, bombas para turbinas, medidores de caudal de água quente, válvulas, entre outros [10].

O PEEK é a policetona aromática mais comercializada [16]. Na figura 17 podem ser vistas as unidades repetitivas da PEEK.

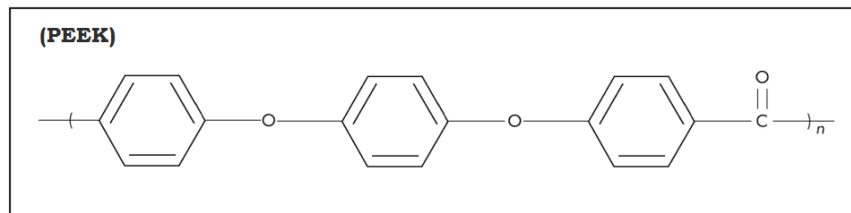


Figura 17 – Unidades repetitivas de PEEK (adaptado de [17]).

## 2.4. Simulação Numérica

Os projetistas de moldes necessitam de reunir um conjunto de conhecimentos em diversas áreas. Devem ser capazes de, a partir do objeto a injetar, derivar os requisitos funcionais que o molde deve cumprir, e compreender de que forma estes se irão relacionar com os diversos fatores que condicionam o processamento dos materiais termoplásticos. Devem ser capazes de transformar esses requisitos em especificações de fabrico que garantam o correto funcionamento do molde. Essas especificações serão necessariamente obtidas com as tecnologias disponíveis, de modo a minimizar o tempo necessário ao desenvolvimento dos projetos [18].

Para que estas tarefas sejam feitas com a maior brevidade e precisão possíveis, recorre-se frequentemente a softwares que permitem a simulação dos processos de injeção, nomeadamente o Autodesk Moldflow Insight®.

O AMI® é uma ferramenta que permite estudar os processos de moldação por injeção que são utilizados atualmente, possibilitando uma exaustiva simulação e otimização da moldação, bem como do molde associado. Assim, é possível uma redução na fabricação de protótipos, bem como nos custos associados a alterações na

ferramenta moldante. Estes fatores possibilitam também um menor tempo de produção dos produtos, e conseqüentemente da sua introdução no mercado.

No âmbito deste trabalho, o AMI® apresenta valências ao nível da simulação dos processos de moldação multimaterial.

Através deste *software* é possível simular processos de sobremoldação, mais concretamente, moldação sobre insertos, processos de coinjeção e processos *multi-shot* [19]. As figuras 18, 19 e 20 são exemplificativas da aplicação dos processos referidos anteriormente no AMI®.

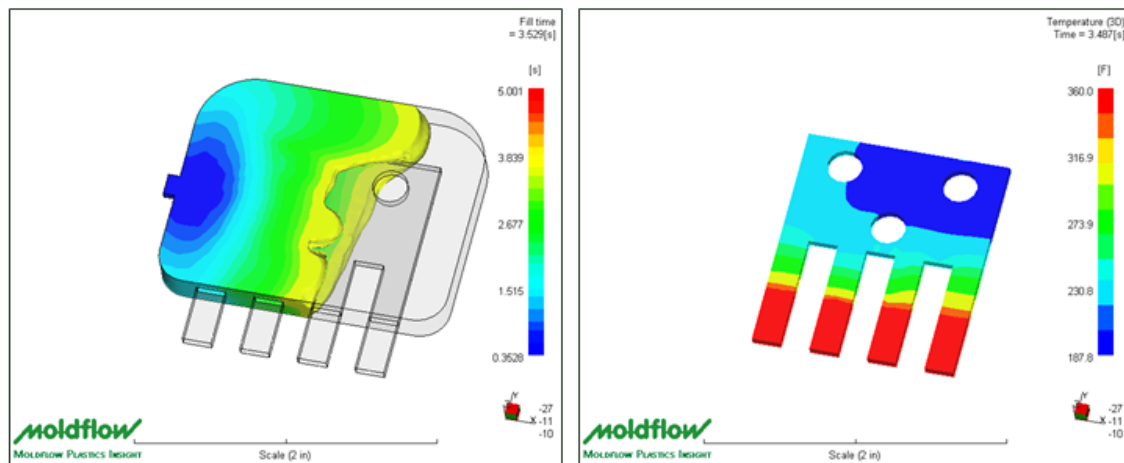


Figura 18– Aplicação do processo de sobremoldação (moldação sobre insertos) através do Autodesk Moldflow Insight® (adaptado de [19]).

Na figura 18, pode ver-se a simulação da sobremoldação de um dado polímero sobre um inserto (à direita). Este poderá ser constituído por um material metálico, polimérico, entre outros. Através deste tipo de simulações é possível prever o empeno do componente resultante da sobremoldação, bem como a temperatura a que o inserto fica sujeito durante este processo.

Esta temperatura tem grande importância, porque poderá provocar a fusão do material do inserto, no caso de este ser constituído por um material termoplástico.

Na figura 19 podem ser observados três componentes que compõem uma chave de aparafusar. No canto inferior esquerdo, pode ver-se o componente metálico, sobre o qual serão sobremoldados dois materiais termoplásticos (canto direito da figura). Esta sobremoldação pode ser feita através do processo *multi-shot*.

Assim, sobre o polímero rígido injetado inicialmente, será injetado um elastômero, conferindo assim *soft-touch* à ferramenta. A figura 20 representa a simulação do tempo de enchimento da ferramenta através do AMI®.

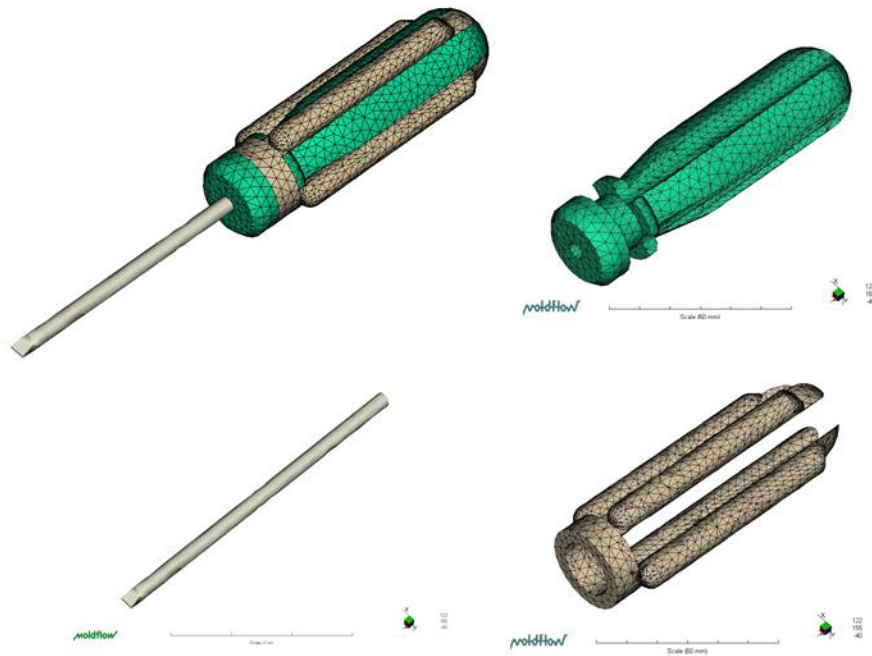


Figura 19– Componentes constituintes da chave de aparafusar (adaptado de [19]).

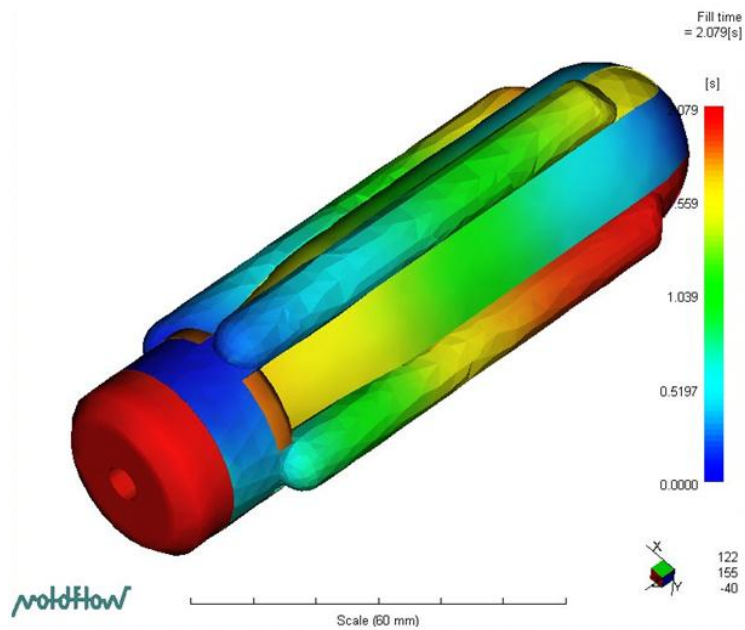


Figura 20– Simulação do enchimento dos componentes da chave de aparafusar através do Autodesk Moldflow Insight® (adaptado de [19]).

## 2.5. Moldação sobre insertos - Estado da Arte

O *design* multifuncional e a *performance* mecânica requerida pela indústria de termoplásticos nos dias que correm possibilitam cada vez mais a substituição dos materiais metálicos por polímeros. Deste modo é possível reduzir custos de produção, visto que o custo dos materiais é bastante distinto. Consequentemente, aplicações relativas à moldação sobre insertos são cada vez mais uma hipótese viável, tanto a nível de *performance* como económico.

Existem alguns fatores chave para potenciar a qualidade das moldações sobre insertos e evitar as excessivas contrações e deflexões que podem originar a inutilização dos produtos. Estes fatores são bastante distintos e foram tidos em conta em diversos estudos efetuados.

Nos estudos [20] e [21] executados numa Universidade na Malásia foi demonstrada a utilidade do DOE (*design of experiments*), mais precisamente, o método de Taguchi, como forma de determinação dos parâmetros de processamento mais adequados, tendo em vista a redução da deflexão. Assim, através de uma matriz ortogonal, é possível, apenas por meio de nove simulações, antecipar quais os fatores decisivos para redução de empenos, algo que por tentativa e erro seria bastante mais moroso. Estes fatores são entre outros, o tempo de enchimento, a temperatura do fundido, o tempo de compactação, a pressão de compactação e a temperatura do molde.

No Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, conduziu-se um estudo [12] acerca da sobremoldação de um componente PBT num inserto de latão.





Figura 21- Sobremoldação do PBT num inserto de bronze (adaptado de [12]).

Este caso de estudo reporta o trabalho desenvolvido no âmbito de um problema verificado na indústria (figura 21), onde ocorre a fratura do componente de PBT. A fratura ocorre na zona da peça oposta à localização do ponto de injeção, onde se forma a linha de soldadura, e que corresponde naturalmente à zona mais crítica da peça. Esta tem espessuras variáveis e a sua contração após a moldação provoca uma diminuição das mesmas, originando a fratura do componente.

O coeficiente de expansão térmica entre as duas matérias primas utilizadas é bastante diferente, sendo o do PBT bastante superior ao do latão. Estas diferenças provocam deformações excessivas entre o plástico e o latão.

A simulação da peça em PBT ocorreu com e sem o inserto em latão. Nos estudos em que o inserto foi considerado, foram testadas quatro diferentes temperaturas para o mesmo. Os resultados permitiram concluir que o pré-aquecimento do inserto antes da sua sobremoldação ajuda a reduzir as tensões excessivas na interface termoplástico/inserto resultando assim num aumento da contração radial da parte plástica. Isto acontece como resultado do crescimento da expansão térmica linear do inserto de latão durante o ciclo de moldação, facilitando assim as contrações.

A espessura do plástico em torno do inserto é também um fator importante a ser considerado. Os resultados do estudo demonstraram que, à medida que a espessura do componente plástico é aumentada, a contração da mesma também aumenta. Este fenómeno foi observado tanto com a moldação sobre o inserto como através da simples moldação do componente plástico. No entanto, após a sobremoldação sobre o

inseto de bronze, constatou-se que a diferença de deflexão entre as secções com maior e menor espessura da peça plástica aumentou para o dobro, relativamente à injeção simples (sem inseto) [12].

Os benefícios dos materiais cerâmicos são amplamente conhecidos: boa dureza, força mecânica, boa resistência ao desgaste e à corrosão, e baixos coeficientes de atrito e de expansão térmica. No entanto, o material cerâmico é bastante quebradiço e por isso difícil de maquinar.

A N.C.A Technologies (empresa especializada em transporte de fluídos para as indústrias farmacêuticas, de cosméticos e de processamento alimentar) conduziu um estudo [4] acerca da sobremoldação de um material polimérico sobre um inseto de um material cerâmico.

Este caso de estudo visa a introdução no mercado de elementos compósitos cerâmicos criados especialmente para o transporte de produtos de indústrias farmacêuticas, químicas e alimentar.

Este tipo de transporte é feito com o recurso a um componente cerâmico com geometria cilíndrica, ao qual é agregado exteriormente um componente metálico de suporte que revela alguns problemas ao nível da higiene, devido à interface entre os materiais, e que por outro lado tem elevados custos de produção.

O estudo pretende assim, a substituição do material metálico descrito no produto anterior por um material termoplástico, que permitirá a obtenção de menores custos de fabricação, bem como uma melhor adesão entre materiais.

Para tal, após a produção do componente cerâmico é necessária a criação de entalhes na parede exterior do mesmo. Posteriormente, este será introduzido num molde onde será sobremoldado com um termoplástico.

Os entalhes anteriormente referidos permitem a distribuição eficaz das tensões criadas devido à diferença entre os coeficientes de expansão dos dois materiais.

Foram experimentadas diferentes profundidades para os entalhes. As profundidades ideais situam-se entre os valores 0.5 e 0.4 mm.

A inexistência de entalhes ou a utilização dos mesmos apenas com 0.1 mm de profundidade leva a uma rápida separação dos componentes. Por outro lado um

aumento excessivo da profundidade dos mesmos pode significar um enchimento incompleto na fase de sobremoldação (fenómeno de hesitação) [4].



## Capítulo 3 – Análise metodológica

O principal objetivo deste estudo foi desenvolver metodologias para a análise e otimização de sistemas de moldação multimaterial. Assim, selecionou-se para o efeito um produto para a indústria farmacêutica, alimentar e de cosméticos.

O caso selecionado como objeto de estudo foi então modelado em ferramentas CAD, seguindo-se os estudos numéricos em AMI®, que foram delineados através de metodologias de DOE.

Após a realização da análise paramétrica foi possível tirar elações acerca do comportamento multimaterial com as variáveis de processamento, bem como das diferentes opções de *design* considerados.

O processo de moldação multimaterial escolhido para o desenvolvimento do estudo foi a moldação sobre insertos.

### 3.1. Desenvolvimento do modelo

De modo a conseguir atingir os objetivos propostos anteriormente, foi necessária a utilização de sistemas CAD e CAE, respetivamente o *software* Catia Dassault Systems® e Autodesk Moldflow Insight®. Através do Catia Dassault Systems® foram desenvolvidos diversos modelos concetuais, posteriormente importados para o Autodesk Moldflow Insight® para efetuar a análise numérica do processo de moldação por injeção sobre insertos. Todas estas simulações foram executadas após a aplicação de DOE (*design of experiments*), que permitiu uma definição mais assertiva dos parâmetros de processamento para cada tipo de interface.

Foram efetuadas moldações por injeção sobre insertos, utilizando diversas espessuras de termoplástico, bem como, diferentes profundidades de entalhes.

As espessuras do plástico a injetar variaram entre 1 e 5 mm, e a profundidade dos entalhes entre 0.1 e 1 mm.

Foram também utilizados diferentes materiais termoplásticos e cerâmicos (materiais que compõe o inserto). Os termoplásticos utilizados foram a polisulfona (termoplástico amorfo de elevado desempenho) e a polieteretercetona (termoplástico semicristalino de alto desempenho). Já no que diz respeito aos materiais cerâmicos, foram utilizados a zircónia e a alumina.

### **3.1.1. Utilização de termoplásticos de elevado desempenho**

Os termoplásticos de elevado desempenho (TED) são polímeros comerciais que satisfazem especificações aplicacionais muito exigentes, correspondendo ao limite de aplicação dos sistemas poliméricos termoplásticos, sendo que, representam uma parte bastante reduzida do consumo de termoplásticos numa base anual [5].

Tendo em conta as características destes materiais, referidas anteriormente na secção 2.3.4.1, é facilmente perceptível a escolha deste tipo de termoplásticos tendo em conta o estudo que se pretende realizar. Assim, através da utilização dos mesmos será possível o suporte adequado para o material cerâmico, tendo em conta as necessidades intrínsecas da aplicação a que estará sujeito.

### **3.1.2. Utilização de cerâmicos em contacto direto com os fluídos**

A utilização de materiais cerâmicos prende-se com o facto de estes proporcionarem boa dureza, força mecânica, boa resistência ao desgaste e à corrosão, e baixos coeficientes de atrito e de expansão térmica. Por outro lado são materiais que têm baixas taxas de desprendimento de partículas, o que é essencial tendo em conta o tipo de produtos que se pretendem transportar. Adicionalmente são os materiais indicados para resistir à exposição a temperaturas entre os -10 e 140°C, fruto do

transporte das diversas matérias, bem como das regulares desinfecções e esterilizações a que têm de ser submetidos no caso que se pretende estudar [4].

### **3.1.3. Design e introdução de entalhes**

Com base em estudos efetuados anteriormente, a utilização de entalhes em insertos, promove uma melhor adesão com o termoplástico sobremoldado, e para além disso, permite um alívio das tensões residuais que são uma das causas da fratura das peças sujeitas a moldação multimaterial.

Deste modo, através dos entalhes introduzidos na superfície dos insertos cerâmicos é possível também evitar movimento relativo entre o cerâmico e o plástico após a sobremoldação, bem como diminuir o empeno criado no termoplástico [4].

## **3.2. Modelação 3D**

### **3.2.1. CAD\CAE**

Cada vez mais são utilizados os sistemas CAD/CAE na indústria de moldes. São uma forma rápida e eficaz de reduzir os tempos de produção, bem como alterações já no decorrer da produção, o que permite uma redução de custos bastante acentuada, tal como pode ser visto na figura 22.

Através dos sistemas CAD é possível desenvolver todos os passos necessários para a obtenção de produtos de elevada qualidade, desde o desenvolvimento das peças e dos moldes até a produção e construção dos mesmos, respetivamente. Para atingir os objetivos definidos para este estudo foi utilizado o *software* Catia Dassault Systems® para modelar tridimensionalmente os modelos necessários [22].

Por outro lado os sistemas CAE são também grandes responsáveis pelo sucesso no desenvolvimento de peças para moldação por injeção. Através de *softwares* como o

Autodesk Moldflow Insight® é possível estudar os processos de moldação por injeção (simples, multimaterial, entre outros), permitindo uma exaustiva simulação e otimização das condições de processamento que lhe estão associadas. O padrão de enchimento, as pressões requeridas, bem como a contração e o empenamento podem ser analisados durante a fase de desenvolvimento, evitando a necessidade de moldações tentativa erro após a produção do molde. A experiência adquirida após a simulação através de *softwares* apropriados tem provado ser o melhor método para desenvolver novos produtos com um mínimo tempo de desenvolvimento e reformulações necessárias [22;23].

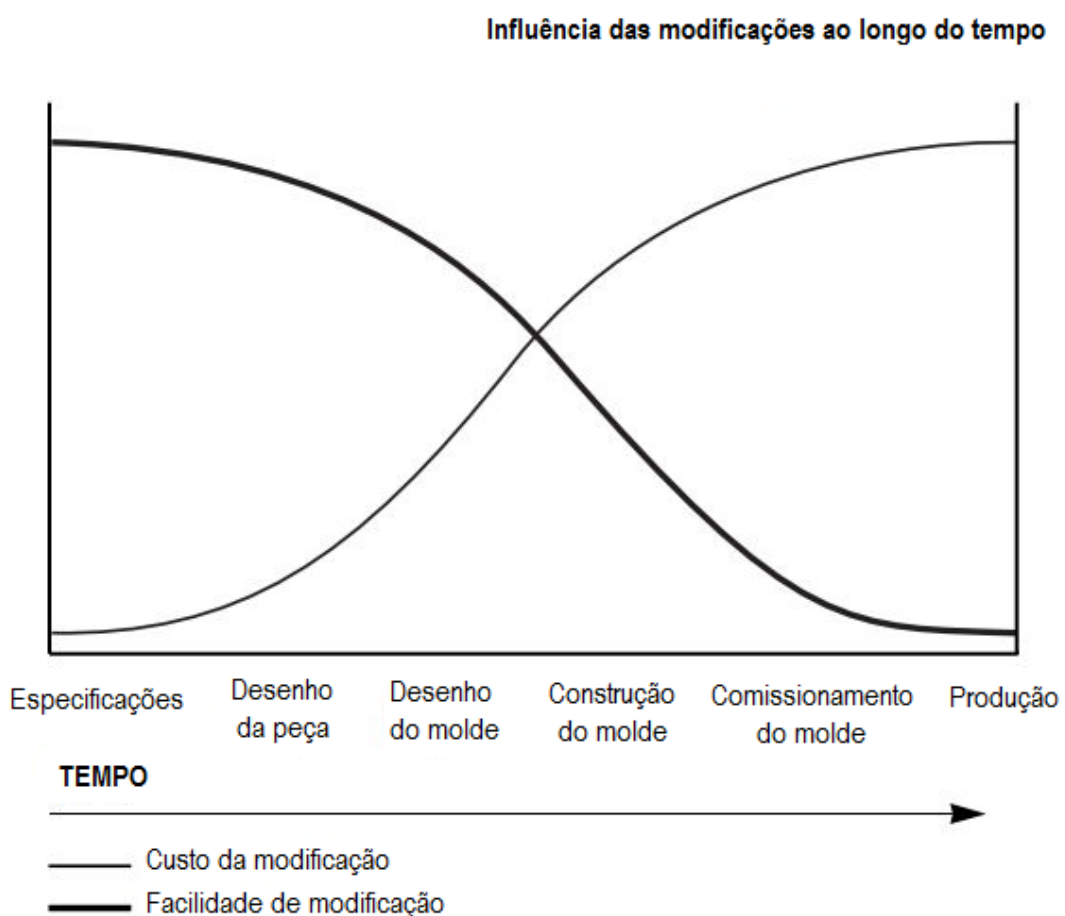


Figura 22 - Influência das modificações ao longo do processo de produção (adaptado de [24]).



### 3.2.2. Modelos de estudo

O primeiro modelo de estudo consiste numa manga de suporte injetada sobre um inserto de material cerâmico (Alumina A-960® e Zircónia Z-507®) com espessura constante de 2mm. Os materiais utilizados para a injeção foram o PSU e o PEEK e as espessuras variáveis entre 1 e 5mm. O modelo pode ser observado nas figuras 23 e 24.

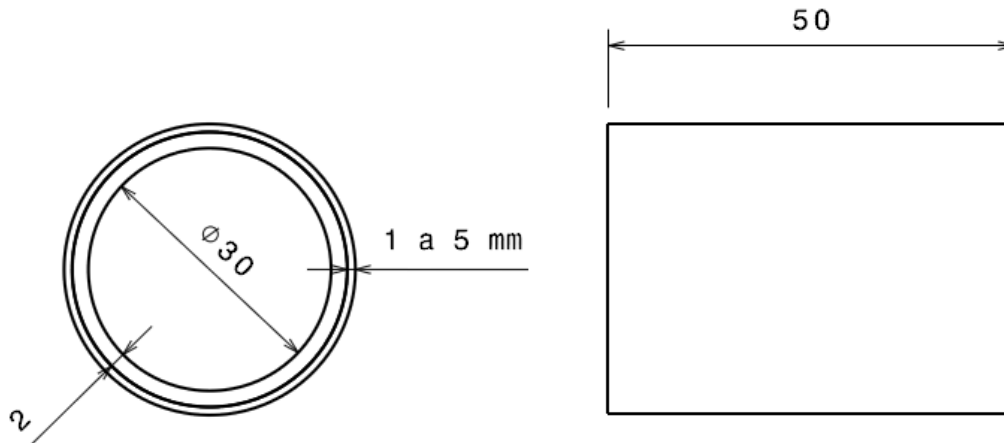


Figura 23 - Esquemática do primeiro modelo de estudo com inserto e sem entalhes, com espessura de termoplástico variável entre 1 e 5 mm.

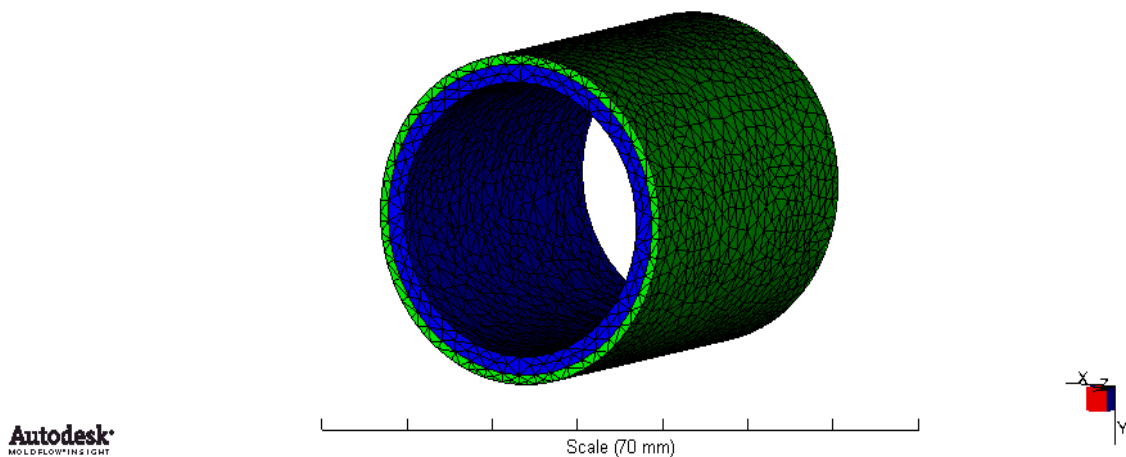


Figura 24 – Exemplificação tridimensional do primeiro modelo de estudo com inserto e sem entalhes, com espessura de termoplástico variável entre 1 e 5 mm.

O segundo modelo consiste novamente numa manga de suporte injetada sobre um inserto de material cerâmico (Alumina A-960® e Zircónia Z-507®) com espessura constante de 2mm. Neste inserto existem entalhes com profundidades variáveis entre

0.1 e 1 mm. Os materiais utilizados para a injeção foram o PSU e o PEEK com espessura constante de 3mm. Este modelo pode ser observado nas figuras 25,26 e 27.

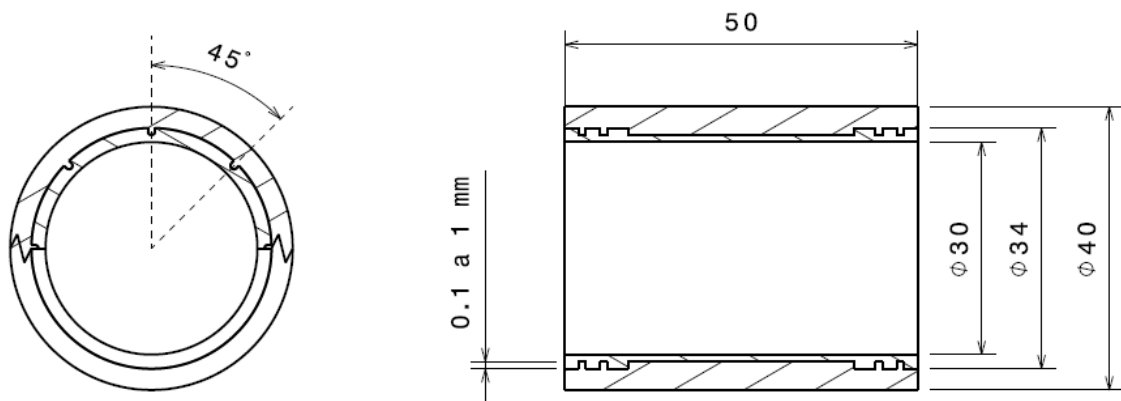


Figura 25 - Esquematização do segundo modelo de estudo com inserto e entalhes com profundidade de 0.1 a 1 mm.

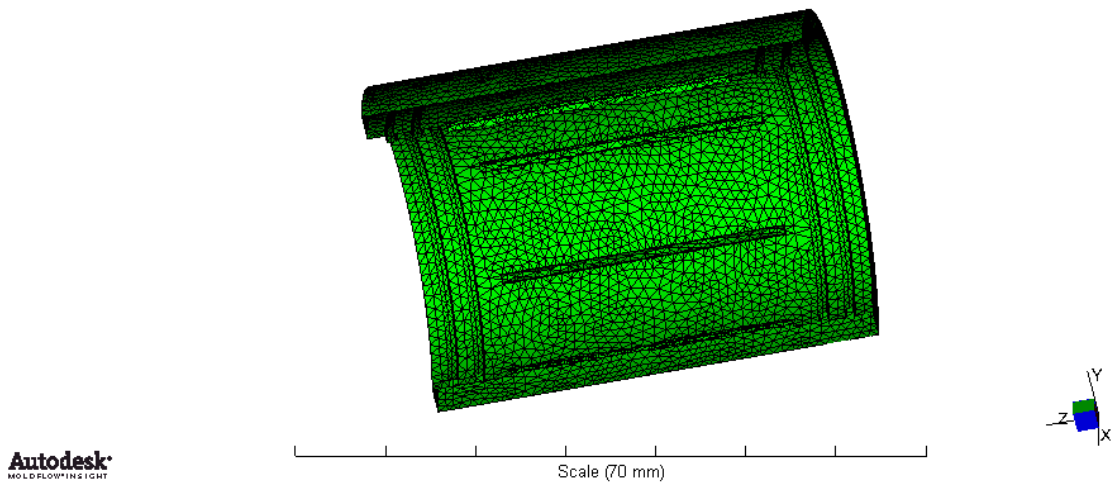


Figura 26 – Exemplificação tridimensional em corte do termoplástico com entalhes de 0.1 a 1 mm correspondente ao terceiro modelo de estudo.

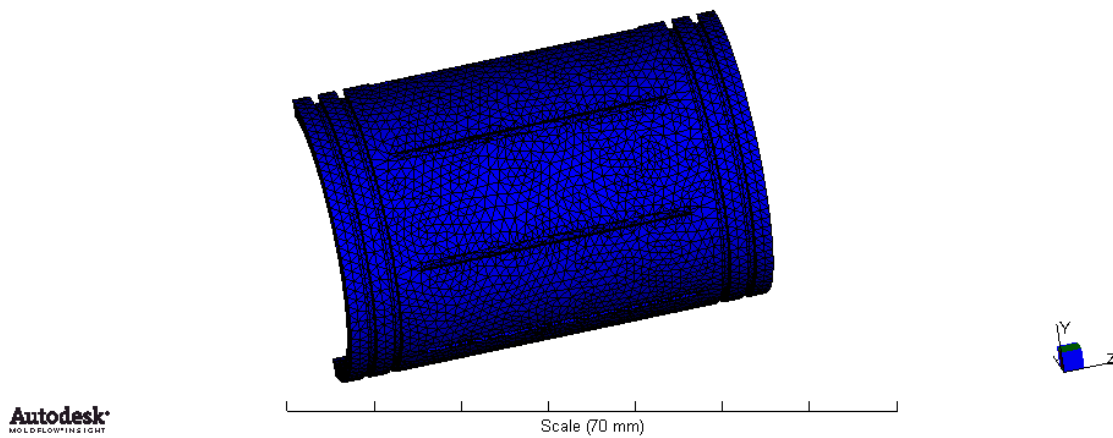


Figura 27 - Exemplificação tridimensional em corte do inserto com entalhes de 0.1 a 1 mm correspondente ao terceiro modelo de estudo.

### 3.3. Estudos numéricos

#### 3.3.1. Análise de malhas e adequabilidade do domínio de cálculo

O Autodesk Simulation Moldflow Design Link® (AMDL) é um programa adicional para o AMI®, que permite a transformação geométrica de dados entre o Autodesk Moldflow® e os sistemas CAD, nomeadamente o Catia Dessaut Systems® [9]. Deste modo, através do AMDL é possível gerar malhas tridimensionais muito precisas em componentes importados de sistemas CAD. No caso de *assembly*, as faces comuns devem ter nós alinhados para que os resultados tenham um grau de exatidão elevado [9].

Após a modelação dos diversos componentes a serem testados, através do CATIA®, estes foram importados com recurso ao AMDL para o AMI®, onde foram submetidos à geração de uma malha tridimensional através da opção de alinhamento preciso entre nós. No caso da malha tridimensional, pelo *software* AMI®, recomenda-se que esta tenha uma razão de aspeto ou fator de forma entre 1 e 50, o que foi respeitado em todos os modelos importados [9]. As estatísticas relativas à malha de cada modelo podem ser verificadas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Estatísticas de malha relativas ao modelo de estudo com espessuras variáveis entre 1 e 5 mm com insertos sem introdução de entalhes.

		1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
<b>Elementos</b>	Malha	tetraedros	tetraedros	tetraedros	tetraedros	tetraedros
	Número de elementos	125666	116121	110034	104929	99662
	Número de nós	23863	22126	21356	20082	19111
	Volume (cm <sup>3</sup> )	15,569	21,398	27,471	33,952	40,708
	Razão de aspeto máx.	42,6	30,5	28,9	28,5	31,4
<b>Beams</b>	Número de <i>beams</i>	62	62	62	62	62
	Volume (cm <sup>3</sup> )	0,624	0,882	1,235	1,515	1,822

**Tabela 3 - Estatísticas de malha relativas ao modelo de estudo com insertos e entalhes nos mesmos com profundidades entre 0.1 e 1mm.**

		<b>0.1mm</b>	<b>0.2mm</b>	<b>0.3mm</b>	<b>0.4mm</b>	<b>0.5mm</b>
<b>Elementos</b>	Malha	tetraedros	tetraedros	tetraedros	tetraedros	tetraedros
	Número de elementos	407390	546784	547892	550426	597281
	Número de nós	76233	102927	102912	103364	111590
	Volume (cm <sup>3</sup> )	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
	Razão de aspeto máx.	44,5	28,4	29,9	29,1	29,9
<b>Beams</b>	Número de <i>beams</i>	62	62	62	62	62
	Volume (cm <sup>3</sup> )	1,535	1,535	1,535	1,535	1,535
		<b>0.6mm</b>	<b>0.7mm</b>	<b>0.8mm</b>	<b>0.9mm</b>	<b>1mm</b>
<b>Elementos</b>	Malha	tetraedros	tetraedros	tetraedros	tetraedros	tetraedros
	Número de elementos	641156	633740	653895	674889	720244
	Número de nós	118601	116878	119849	123547	131155
	Volume (cm <sup>3</sup> )	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
	Razão de aspeto máx.	28,7	30	29,6	28,5	42,4
<b>Beams</b>	Número de <i>beams</i>	62	62	62	62	62
	Volume (cm <sup>3</sup> )	1,535	1,535	1,535	1,535	1,535

Relativamente ao sistema de alimentação, foi utilizado um sistema de canais frios, que pode ser observado nas figuras 28 e 29 e cujas dimensões para cada caso de estudo são apresentadas na tabela 4.

**Tabela 4 - Dimensões dos sistemas de alimentação para as diversas espessuras dos modelos.**

	<b>Jito</b>	<b>Poço frio</b>	<b>Alimentador</b>	<b>Ataque</b>
<b>1mm</b>	∅1,5 – ∅3,5	∅3,5 – 2,5°	∅2,5	∅2,5 - ∅1
<b>2mm</b>	∅ 2 – ∅4	∅4 – 2,5°	∅3	∅3 - ∅1,2
<b>3mm</b>	∅3 - ∅5	∅5 – 2,5°	∅4	∅4 – ∅1,4
<b>4mm</b>	∅ 4 – ∅6	∅6 - 2,5°	∅5	∅5 – ∅1,6
<b>5mm</b>	∅ 4,5 – ∅6,5	∅6,5 – 2,5°	∅5,5	∅5,5 – ∅1,8

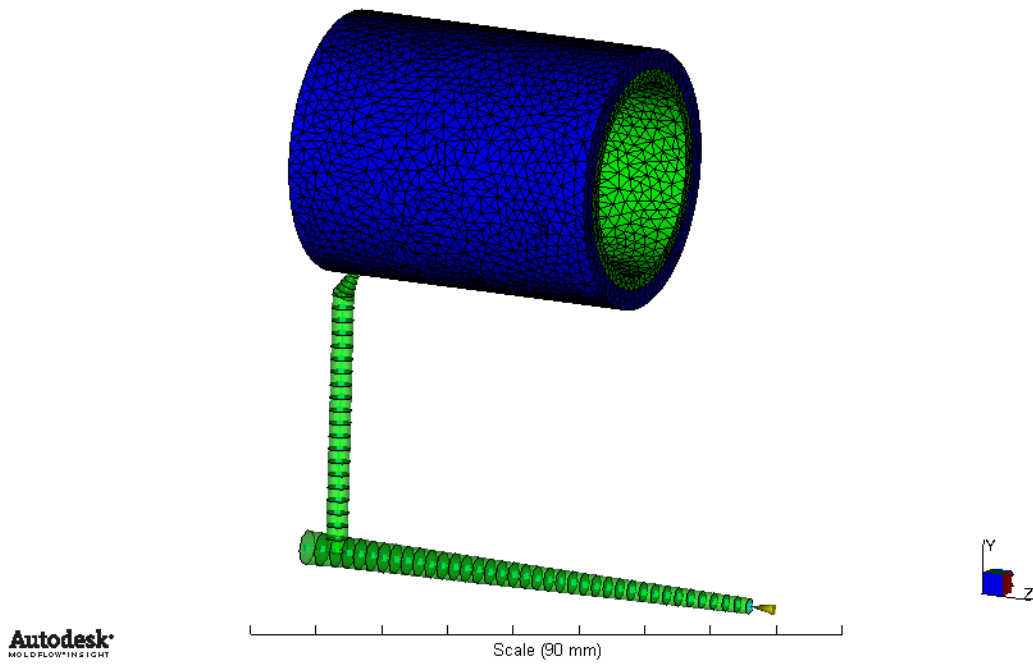


Figura 28 – Exemplificação do sistema de alimentação de canais frios relativo ao primeiro modelo.

Na figura 29 pode ser visto em corte o sistema de alimentação relativo ao segundo modelo.

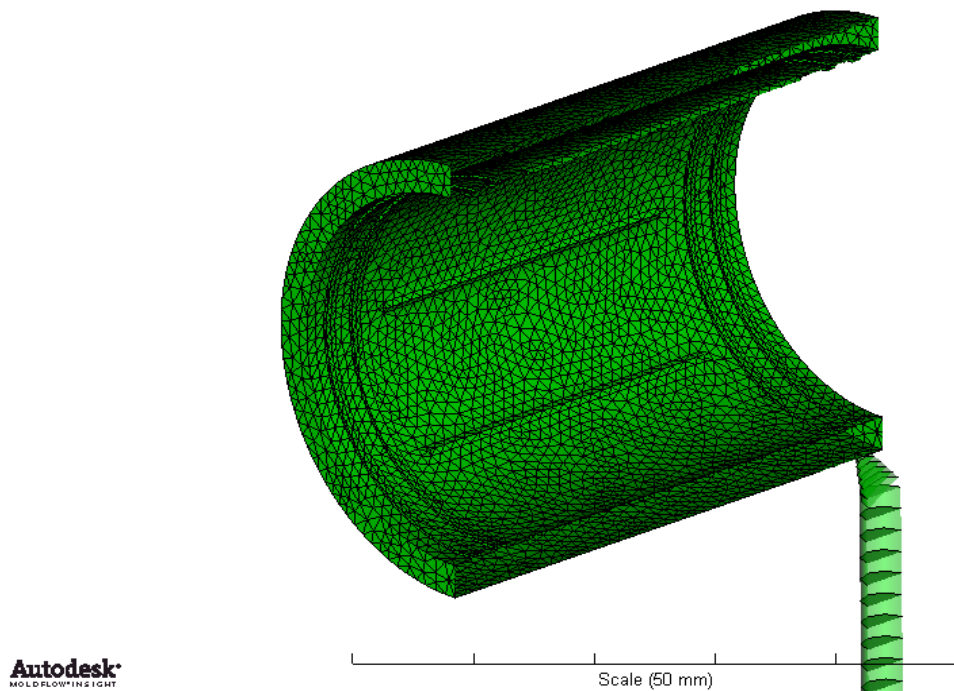


Figura 29 - Exemplificação do sistema de alimentação de canais frios relativo ao segundo modelo.

### 3.3.2. Equipamentos e materiais

Os materiais escolhidos para os insertos foram a Alumina A-960<sup>®</sup> e a Zircónia Z-507<sup>®</sup>. Estes são materiais produzidos pela *BCE-Special Ceramics*, uma empresa Alemã de produção de componentes com cerâmicos de alta performance, e cujas propriedades foram adicionadas à base de dados de materiais do AMI<sup>®</sup>.

Para o material do molde foi utilizado um aço constante da base de dados do AMI<sup>®</sup>. As propriedades dos materiais descritos podem ser verificadas na tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades dos materiais referentes aos insertos (Alumina e Zircónia) e ao molde (P-20).

	Alumina A-960 <sup>®</sup>	Zircónia Z-507 <sup>®</sup>	P-20	Unidades
Densidade ( $\rho$ )	3,7	5,7	7,8	[g/cm <sup>3</sup> ]
Calor específico ( $C_p$ )	900	550	460	[J/kg °C]
Condutividade térmica ( $k$ )	25	2	29	[W/m °C]
Módulo de elasticidade ( $E$ )	350000	20000	205000	[MPa]
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,22	0,3	0,29	
Coefficiente de expansão térmica ( $\alpha$ )	0,85e-005	1,05e-005	1,2e-005	[1/°C]

Os polímeros utilizados, bem como a máquina de injeção foram escolhidos através da base de dados do AMI<sup>®</sup> e as suas propriedades podem ser vistas nas tabelas 6 e 7, respetivamente.

Tabela 6 – Propriedades dos termoplásticos “PSU Mindel B-360: Solvay Advanced Polymers” e “VESTAPEEK 2000G: Evonik Degussa GmbH”.

		PSU	PEEK	Unidades
<b>Processamento Recomendado</b>	Temperatura do molde ( $T_{molde}$ )	80	180	[°C]
	Temperatura do fundido ( $T_{fundido}$ )	290	370	[°C]
	Temperatura de extração ( $T_e$ )	160	295	[°C]
	Temperatura de transição ( $T_g$ )	171	304	[°C]
<b>Propriedades Mecânicas</b>	Módulo de Elasticidade ( $E_1; E_2$ )	4500	8704,55	[MPa]
		4500	5105,13	[MPa]
	Coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}; \nu_{13}$ )	0.4	0,4212	
		0.4	0,4682	
	Módulo ao corte ( $G$ )	1607	2187,22	[MPa]
	Coeficiente de expansão térmica ( $\alpha_1; \alpha_2$ )	4,35e-005	1,85e-005	[1/°C]
4,35e-005		3,89e-005	[1/°C]	
<b>Propriedades Térmicas</b>	Calor específico ( $C_p$ )	1774	2245	[J/Kg°C]
	Temperatura ( $T$ )	290	370	[J/Kg°C]
	Condutividade térmica ( $k$ )	0,26	0,335	[W/m°C]

Tabela 7 – Especificações da máquina de injeção “Allrounder 220 S 17 tons 1.3 oz (18mm)”.

Unidade de Injeção	Curso máximo	55,58 (mm)
	Taxa máxima	32 (cm <sup>3</sup> /s)
	Diâmetro do fuso	18 (mm)
Unidade Hidráulica	Pressão Máxima	25 (MPa)
	Relação de intensificação	01:10
	Tempo de resposta	0,2 (s)
Unidade de Fecho	Força máxima	15,4173 ton

### 3.4. Análise DOE

O *Design of Experiment* (DOE) é uma ferramenta estatística que permite observar o efeito de variáveis experimentais no que diz respeito à qualidade dos modelos testados [9].

O método de Taguchi é uma conhecida técnica que proporciona uma metodologia eficiente e sistemática para otimização de processos. Tem sido amplamente aplicado para *design* de produtos e otimização de processos [20]. Desta forma, é possível perceber a sensibilidade dos modelos às diferentes variáveis do processo de uma forma mais rápida (através de um menor número de experiências necessárias) e com maior qualidade relativamente ao processo convencional de tentativa erro. Deste modo os custos de desenvolvimento dos produtos são reduzidos substancialmente [9].

Taguchi propõe um plano experimental através de uma matriz ortogonal em que são combinados diferentes parâmetros e os seus respetivos níveis para cada experiência, permitindo através de um número mínimo de experiências alcançar os parâmetros ideais, com vista, neste caso em particular, à minimização da deflexão [20;21].



Através dos resultados obtidos é possível através do método de análise de variância (ANOVA) calcular as percentagens de contribuição dos diferentes fatores na deflexão final [21].

### 3.4.1. Seleção de fatores

Existem diversos fatores que influenciam o empeno. Tempo de enchimento, temperatura do molde, dimensões dos ataques, temperatura do fundido, pressão de compactação e tempo de compactação. A temperatura do molde é difícil de controlar, devido à temperatura ambiente, por isso é excluída [20;21].

A tabela 8 contém a lista de fatores utilizados para a simulação do modelo com inserto e espessura de termoplástico (PSU) a injetar de 1mm. Os valores utilizados têm como referência as condições de processamento recomendadas pelo Autodesk Moldflow Insight® 2012, apresentadas anteriormente na tabela 6. A explicação do método é feita com base neste estudo.

Tabela 8 – Fatores utilizados e os seus respetivos níveis.

Fatores	nível 1	nível 2	nível 3
Temperatura do fundido, <b>A (°C)</b>	270	290	310
Tempo de enchimento, <b>B (s)</b>	0,4	0,6	0,8
Pressão de compactação, <b>C (%)</b>	60	75	90
Tempo de compactação, <b>D (s)</b>	1	1,5	2

### 3.4.2. Definição do estudo paramétrico

Após a definição dos três níveis dos diferentes fatores, é possível preencher a matriz ortogonal L9, que pode ser vista na tabela 9.

Tabela 9 – Matriz ortogonal L9

Tentativa nº	Temperatura do fundido, A (°C)	Tempo de enchimento, B (s)	Pressão de compactação, C (%)	Tempo de compactação, D (s)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Na tabela 10 podem ver-se os estudos realizados, resultantes da aplicação da matriz L9, bem como os resultados de deflexão provenientes das mesmas.

Tabela 10 – Resultados de deflexão resultantes e S/N das simulações propostas pela matriz ortogonal L9.

Tentativa nº	Temperatura do fundido, A (°C)	Tempo de enchimento, B (s)	Pressão de compactação, C (%)	Tempo de compactação, D (s)	Deflexão (mm)	S/N
1	270	0,4	60	1	0,0271	31,341
2	270	0,6	75	1,5	0,0205	33,765
3	270	0,8	90	2	0,0123	38,202
4	290	0,4	75	2	0,0235	32,579
5	290	0,6	90	1	0,0131	37,655
6	290	0,8	60	1,5	0,0260	31,701
7	310	0,4	90	1,5	0,0162	35,809
8	310	0,6	60	2	0,0283	30,964
9	310	0,8	75	1	0,0253	31,938

Visto que a deflexão no produto final é frequentemente causada por condições de processamento que originam tensões residuais assimétricas na espessura da moldação [13], pretende-se minimizar este efeito, de forma a promover uma melhor adesão entre os dois materiais. Para tal, foi utilizado neste estudo a variante de Taguchi, “quanto menor, melhor” para o cálculo de  $S/N$  (*signal to noise ratio*), que no caso particular do estudo executado nesta tese, não elimina o “ruído” após a execução de diversas simulações, visto que para cada par de fatores é executada apenas uma simulação. Deste modo, visto que o objetivo é encontrar a combinação das condições de processamento que permita a definição da menor deflexão possível, deve ser utilizada a seguinte equação [20;21]:

$$\frac{S}{N} = -10 \log(MSD)$$

$$\text{onde, } MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$$

$MSD = \text{desvio quadrático médio};$

$y = \text{observações};$

$n = \text{número de testes efetuados}.$

Através dos dados apresentados na tabela 10 é possível determinar a tabela de respostas do rácio  $S/N$  (tabela 11), como é exemplificado em baixo para os níveis relativos ao fator A (temperatura do fundido).

$$\text{nível 1} = \frac{31,341 + 33,765 + 38,202}{3} = 34,436$$

$$\text{nível 2} = \frac{32,579 + 37,655 + 31,701}{3} = 33,978$$

$$\text{nível 3} = \frac{35,809 + 30,964 + 31,938}{3} = 32,903$$

$$\text{Diferença} = \text{valor mais elevado} - \text{valor menos elevado} = 34,436 - 32,903 = 1,533$$

Tabela 11 – Tabela de respostas obtida através do rácio S/N.

Nível	Temperatura do fundido (A)	Tempo de enchimento (B)	Pressão de compactação (C)	Tempo de compactação (D)
1	34,436	33,243	31,335	33,645
2	33,978	34,128	32,761	33,758
3	32,903	33,947	37,222	33,915
Diferença	1,533	0,885	5,887	0,270

Com base nas informações apresentadas na tabela 11 é possível construir diagramas de resposta S/N, como os que se apresentam nas figuras 30 a 33.

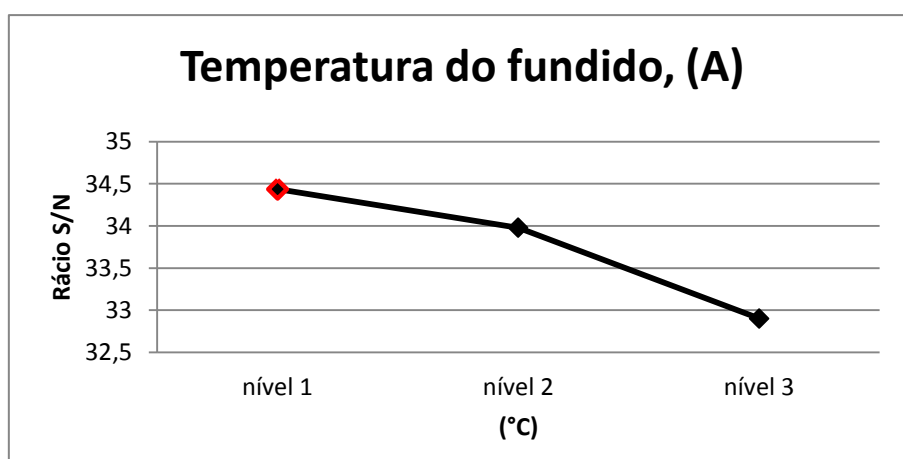


Figura 30 – Resultados de S/N para os diferentes níveis da temperatura do fundido.

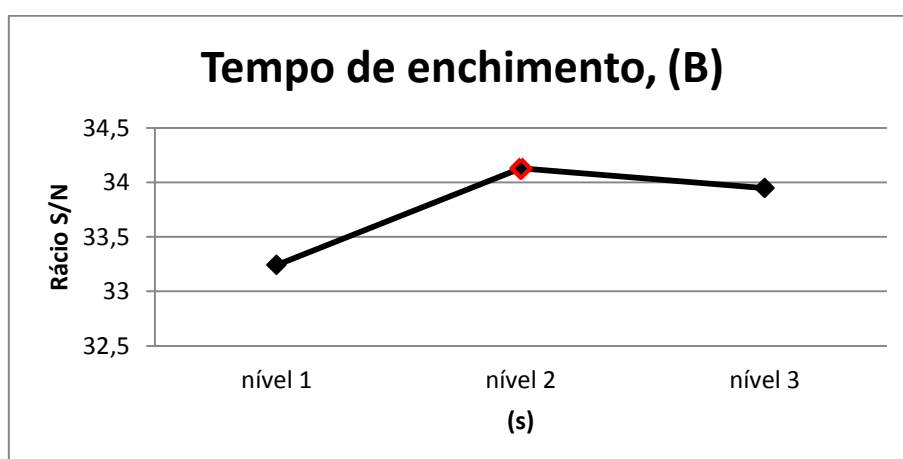


Figura 31 - Resultados de S/N para os diferentes níveis de tempo de enchimento.

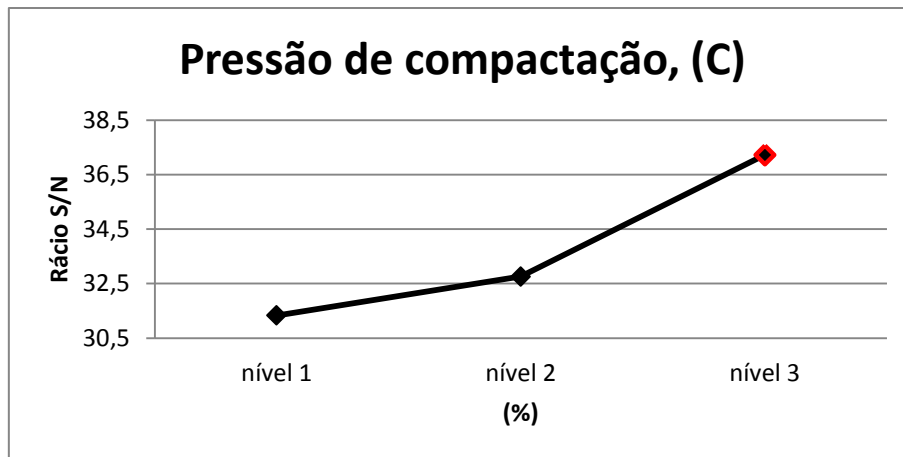


Figura 32 - Resultados de S/N para os diferentes níveis de pressão de compactação.

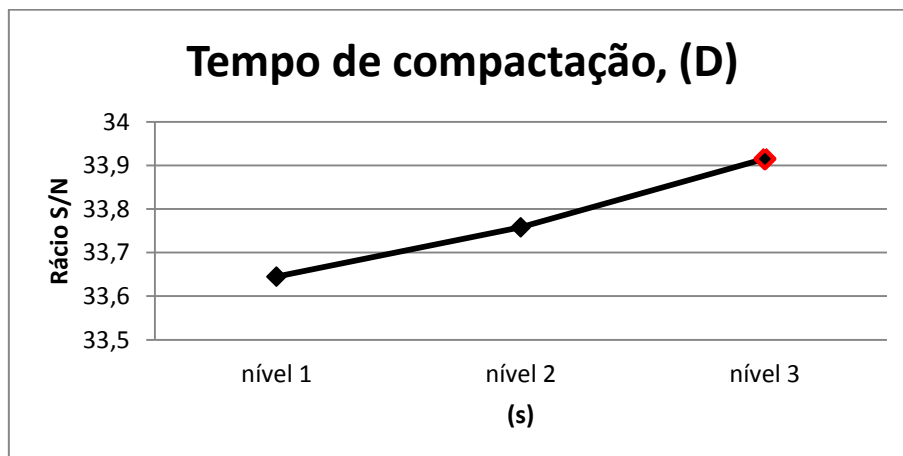


Figura 33 - Resultados de S/N para os diferentes níveis de tempo de compactação.

Através das respostas do rácio S/N, é possível determinar a melhor combinação de parâmetros de processamento, selecionando o valor mais elevado para cada fator.

Na tabela 12 são apresentados os parâmetros de processamento aqui considerados ideais. Por outro lado, a diferença entre níveis, contemplada na tabela 11 permite perceber quais os fatores mais significantes. Assim, o fator mais importante a considerar, tendo em vista minimizar a deflexão é a pressão de compactação, seguida da temperatura do fundido, tempo de enchimento e finalmente do tempo de compactação.

Tabela 12 – Combinação dos parâmetros ideias de processamento com vista a minimizar a deflexão.

Fatores	Valores
Temperatura do fundido, A (°C)	270
Tempo de enchimento, B (s)	0,6
Pressão de compactação, C (%)	90
Tempo de compactação, D (s)	2

### 3.4.2.1. Análise de Variância

Através do método de análise de variância (ANOVA) é possível calcular a percentagem de contribuição relativa dos diferentes fatores na deflexão final.

A análise de variância é um teste estatístico amplamente difundido, e visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores identificados exercem influência em alguma variável dependente. Para tal, são executados os seguintes passos:

#### 3.4.2.1.1. Graus de liberdade

Graus de liberdade totais,  $f_T$

$$f_T = N - 1 = 9 - 1 = 8$$

Para o fator A,  $f_A$

$$f_A = k_a - 1 = 3 - 1 = 2$$

onde,  $k_a$  corresponde ao número de níveis do fator A

Para o erro,  $f_e$

$$f_e = f_T - (f_A + f_B + f_C + f_D) = 8 - (2 + 2 + 2 + 2) = 0$$

### 3.4.2.1.2. Soma dos quadrados

Soma dos quadrados para todos os fatores,  $S_T$

$$S_T = (z_{a1}^2 + z_{a2}^2 + \dots + z_{aN}^2) - \frac{(z_{a1} + z_{a2} + \dots + z_{aN})^2}{N} = 3,0042 \times 10^{-4}$$

Para o fator A,  $S_A$

$$S_A = \left( \frac{(\sum A_1)^2}{k_A} \right) + \dots + \left( \frac{(\sum A_4)^2}{k_A} \right) - \frac{(z_{a1} + z_{a2} + \dots + z_{aN})^2}{N} = 1,746 \times 10^{-5}$$

Para o erro,  $S_e$

$$\begin{aligned} S_e &= S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D) \\ &= 3,0042 \times 10^{-4} \\ &\quad - (1,746 \times 10^{-5} + 4,1267 \times 10^{-6} + 2,775267 \times 10^{-4} + 1,3066 \times 10^{-6}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

### 3.4.2.1.3. Variância

Os valores de variância para todos os fatores são de seguida calculados. Para o fator A,  $V_A$

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} = 8,73 \times 10^{-6}$$

Para o erro,  $V_e$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{0}{0} = 0$$

### 3.4.2.1.4. Rácio F

$$F_A = \frac{V_A}{V_e}$$

$F_A, F_B, F_C, F_D$  e  $F_E$  não podem ser determinados visto que  $V_e = 0$

### 3.4.2.1.5. Percentagem de contribuição

Para determinar a percentagem de contribuição do fator A,  $P_A$

$$P_A = \frac{S_A}{S_T} \times 100 = \frac{1,746 \times 10^{-5}}{3,0042 \times 10^{-4}} \times 100 = 5,8\%$$

A soma dos quadrados, a variância e a percentagem de contribuição dos restantes fatores foi calculada de forma análoga à descrita anteriormente e encontra-se resumida na tabela 13.

Tabela 13 – Tabela de Variância (ANOVA)

Fatores	<i>f</i>	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i> (%)
<b>Temperatura do fundido, A</b>	2	1,746x10 <sup>-5</sup>	8,730x10 <sup>-6</sup>	-	5,8
<b>Tempo de enchimento, B</b>	2	4,126x10 <sup>-6</sup>	2,063x10 <sup>-6</sup>	-	1,3
<b>Pressão de compactação, C</b>	2	2,775x10 <sup>-4</sup>	1,388x10 <sup>-4</sup>	-	92,4
<b>Tempo de compactação, D</b>	2	1,306x10 <sup>-6</sup>	6,533x10 <sup>-7</sup>	-	0,5
<b>Erro</b>	0	0	0		
<b>Total</b>	8	3,0042x10 <sup>-4</sup>			100

Os valores referentes à deflexão utilizados para a aplicação do método de Taguchi correspondem aos máximos globais de cada uma das nove simulações. No entanto, para garantir os critérios de qualidade necessários à produção dos modelos em questão foi escolhido um conjunto de pontos para uma avaliação mais minuciosa.

Deste modo, foram escolhidos doze pontos dos modelos correspondentes a 3 planos (A,B e C) equidistantes, como pode ser comprovado nas figuras 34 e 35.



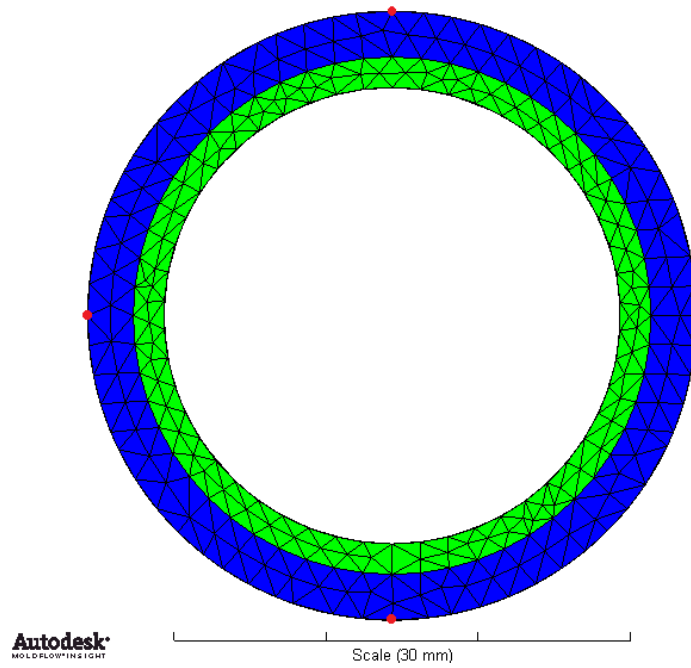


Figura 34 – Exemplo da vista frontal do modelo com espessura de termoplástico 3mm onde estão identificados os pontos escolhidos.

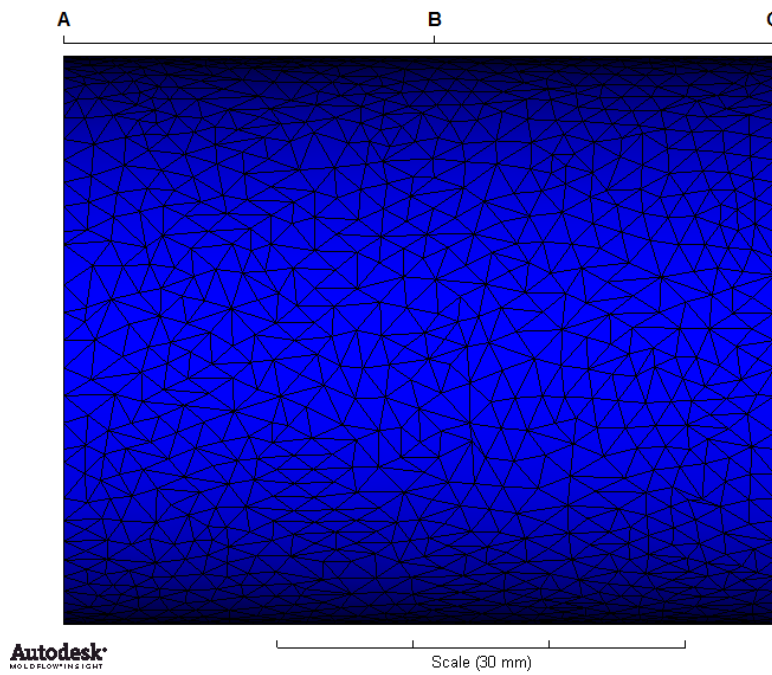


Figura 35 – Vista lateral do modelo com espessura de termoplástico 3mm sem entalhes onde estão identificados os três planos equidistantes escolhidos.

Através da deflexão média dos quatro pontos correspondentes a cada plano, foi possível não só avaliar valores máximos e mínimos, bem como a uniformidade desses valores ao longo do comprimento dos modelos. Na figura 36 é possível observar a comparação entre as duas simulações correspondentes ao método de Taguchi, relativas ao modelo com inserto e espessura de termoplástico (PSU) a injetar de 1mm nas quais se verificaram as deflexões globais máximas e mínimas.

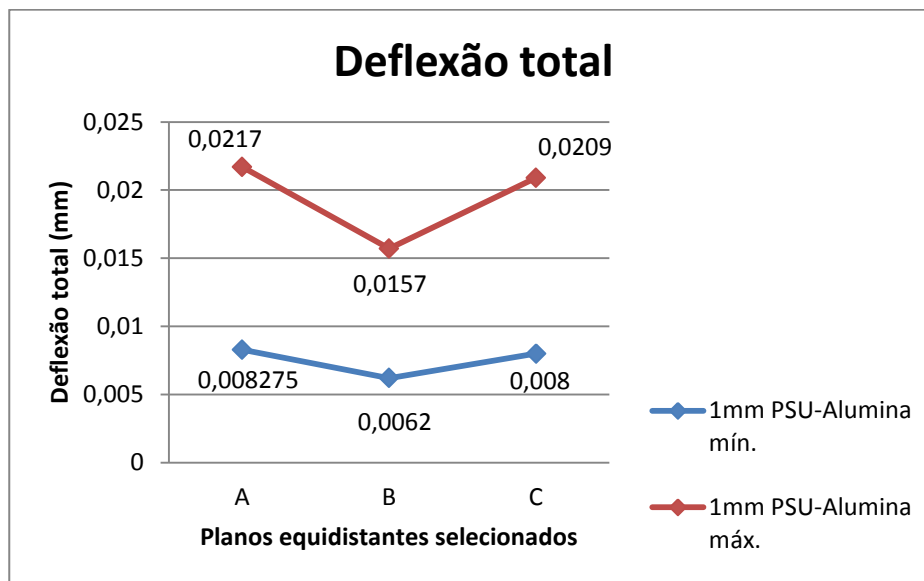


Figura 36 – Comparação entre duas das nove simulações correspondentes ao método de Taguchi onde se registaram os valores máximos e mínimos de deflexão.

O procedimento exemplificado anteriormente foi aplicado aos diversos modelos em estudo, tendo em vista a determinação dos parâmetros de processamento ideais, visando a minimização da deflexão. Estes podem ser observados nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Condições de processamento para os modelos com inserto.

Espessura de termoplástico	Interfaces	Temperatura do fundido (°C)	Tempo de enchimento (s)	Pressão de compactação (%)	Tempo de compactação (s)
1mm	PSU-Alumina	270	0,6	90	2
	PSU-Zircónia	270	0,6	90	1,5
	PEEK-Alumina	360	0,4	90	1,5
	PEEK-Zircónia	360	0,4	90	1,5
2mm	PSU-Alumina	270	0,8	90	3
	PSU-Zircónia	270	0,8	90	3
	PEEK-Alumina	360	0,6	90	2,5
	PEEK-Zircónia	360	0,6	90	2,5
3mm	PSU-Alumina	270	1	90	4
	PSU-Zircónia	270	0,8	90	3,5
	PEEK-Alumina	360	0,8	90	3,5
	PEEK-Zircónia	360	0,8	90	3,5
4mm	PSU-Alumina	270	1,2	90	4,5
	PSU-Zircónia	270	1,2	90	4,5
	PEEK-Alumina	360	1	90	4
	PEEK-Zircónia	360	1	90	4
5mm	PSU-Alumina	270	1,4	90	5,5
	PSU-Zircónia	270	1,2	90	5,5
	PEEK-Alumina	360	1,2	90	5
	PEEK-Zircónia	360	1,2	90	5

Tabela 15 - Condições de processamento para os modelos de 3mm de espessura de termoplástico e com inserto com entalhes de 0.1 a 1mm de profundidade.

Espessura de termoplástico	Interfaces	Temperatura do fundido (°C)	Tempo de enchimento (s)	Pressão de compactação (%)	Tempo de compactação (s)
3mm	PSU-Alumina	270	1	90	4
	PSU-Zircónia	270	0,8	90	3,5
	PEEK-Alumina	360	0,8	90	3,5
	PEEK-Zircónia	360	0,8	90	3,5



# Capítulo 4 - Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os modelos referidos no capítulo anterior através do processo de simulação numérica.

Neste estudo foram analisados alguns problemas no âmbito da moldação sobre insertos por recurso a simulação numérica, de forma a perceber a influência de algumas variáveis na qualidade final das peças. Os parâmetros de processamento, aquecimento de insertos e introdução de entalhes foram analisados permitindo compreender os fenómenos inerentes ao aparecimento de tensões residuais internas (induzidas pelo escoamento e térmicas), que em tanto contribuem para a qualidade e rigor dimensional do produto final.

## 4.1. Importância dos parâmetros de processamento

Os parâmetros de processamento desempenham um papel fundamental tendo em vista a redução do empeno nas moldações.

Nos resultados apresentados nas figuras 37 a 42 é apresentada, em percentagem, a importância dos parâmetros: temperatura do fundido, tempo de enchimento, pressão de compactação e tempo de compactação, com base nos resultados obtidos após a aplicação dos métodos de Taguchi e ANOVA. Deste modo é possível perceber a variação dos mesmos ao longo das diversas espessuras dos termoplásticos testados para a execução da sobremoldação sobre os insertos cerâmicos.

Por outro lado, é também possível tirar algumas conclusões respeitantes à influência da cristalinidade dos termoplásticos tendo em conta as condições de processamento utilizadas.

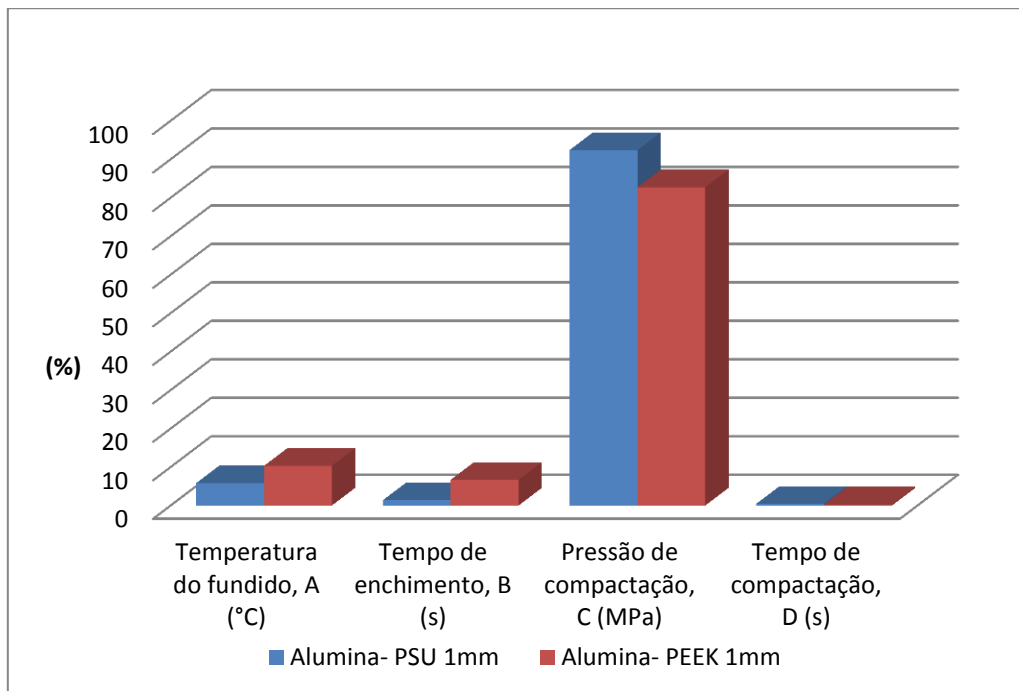


Figura 37 – Influência dos parâmetros de processamento para a interface Alumina/PSU e Alumina/PEEK (1mm).

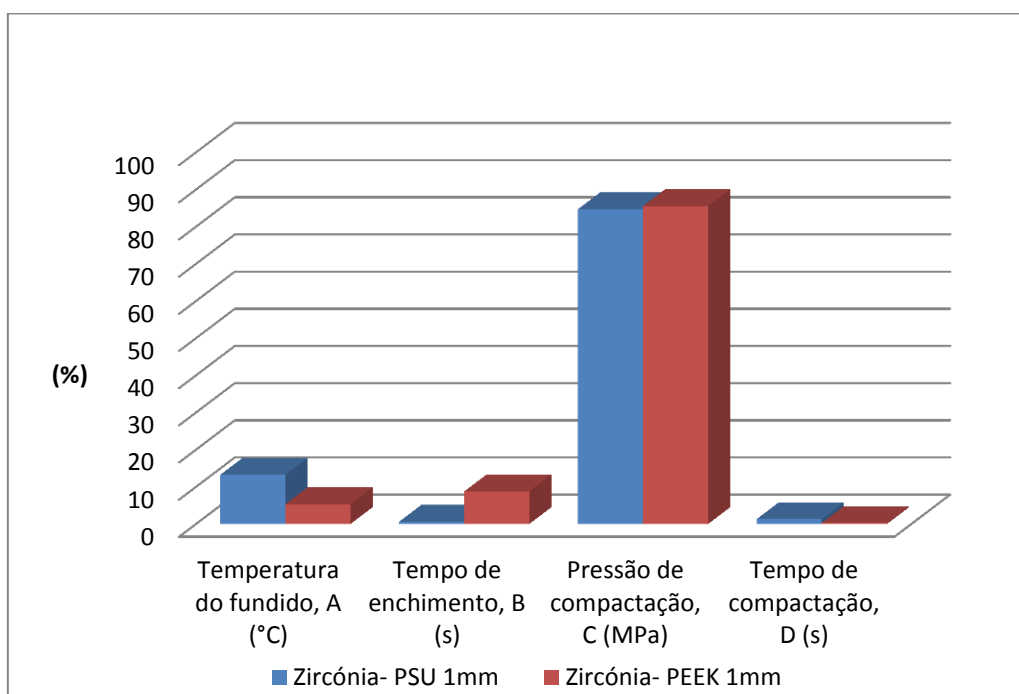


Figura 38 - Influência dos parâmetros de processamento para a interface Zircônia/PSU e Zircônia/PEEK (1mm).

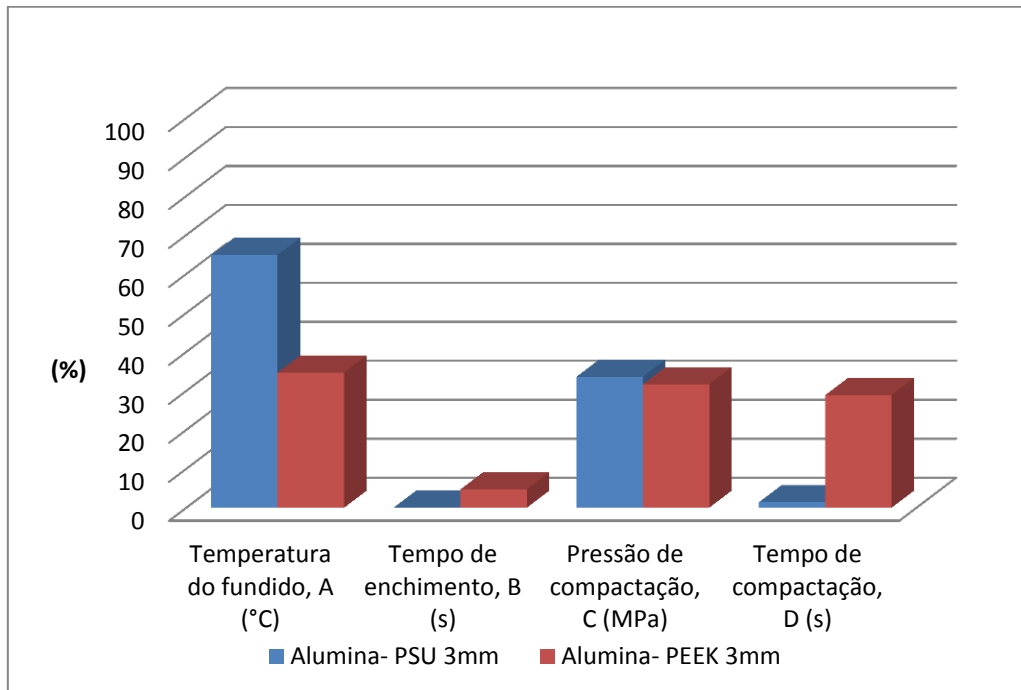


Figura 39 - Influência dos parâmetros de processamento para a interface Alumina/PSU e Alumina/PEEK (3mm).

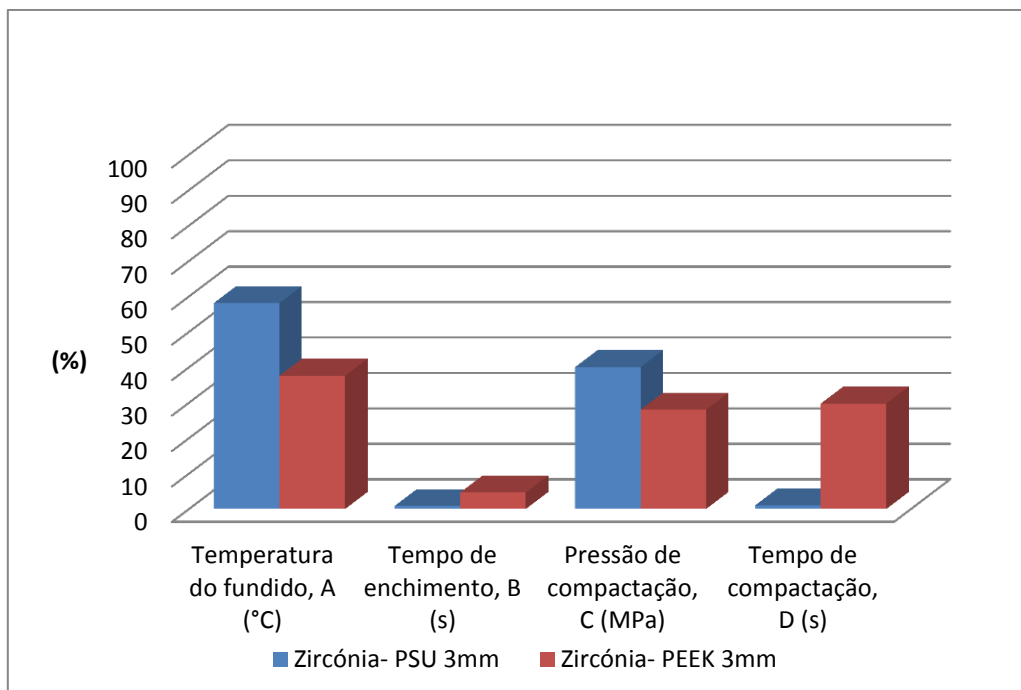


Figura 40 - Influência dos parâmetros de processamento para a interface Zircônia/PSU e Zircônia/PEEK (3mm).

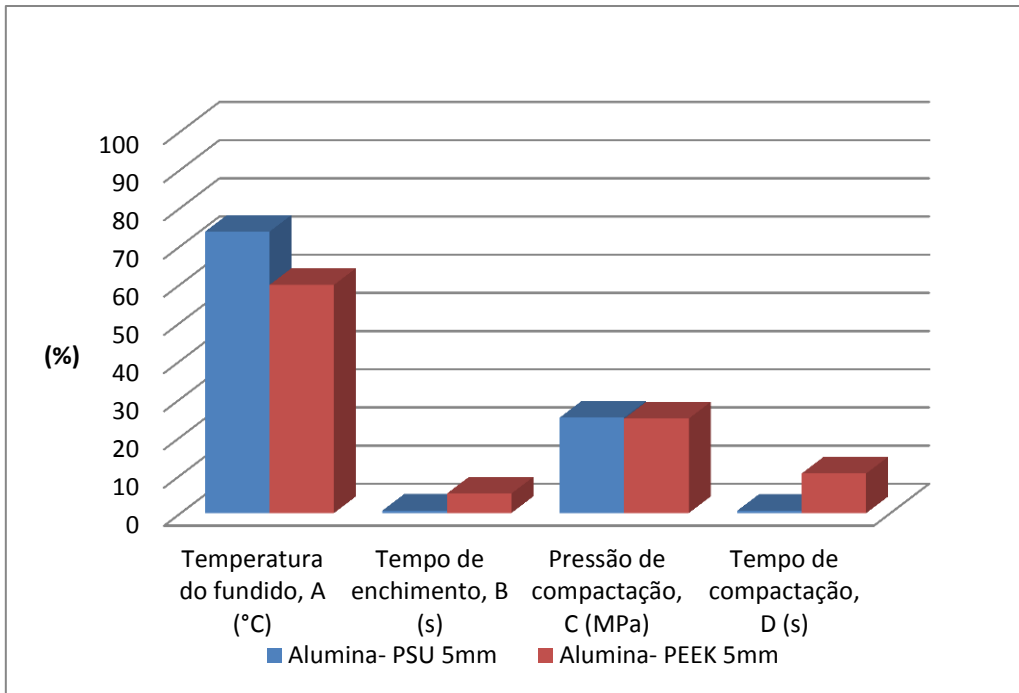


Figura 41 - Influência dos parâmetros de processamento para a interface Alumina/PSU e Alumina/PEEK (5mm).

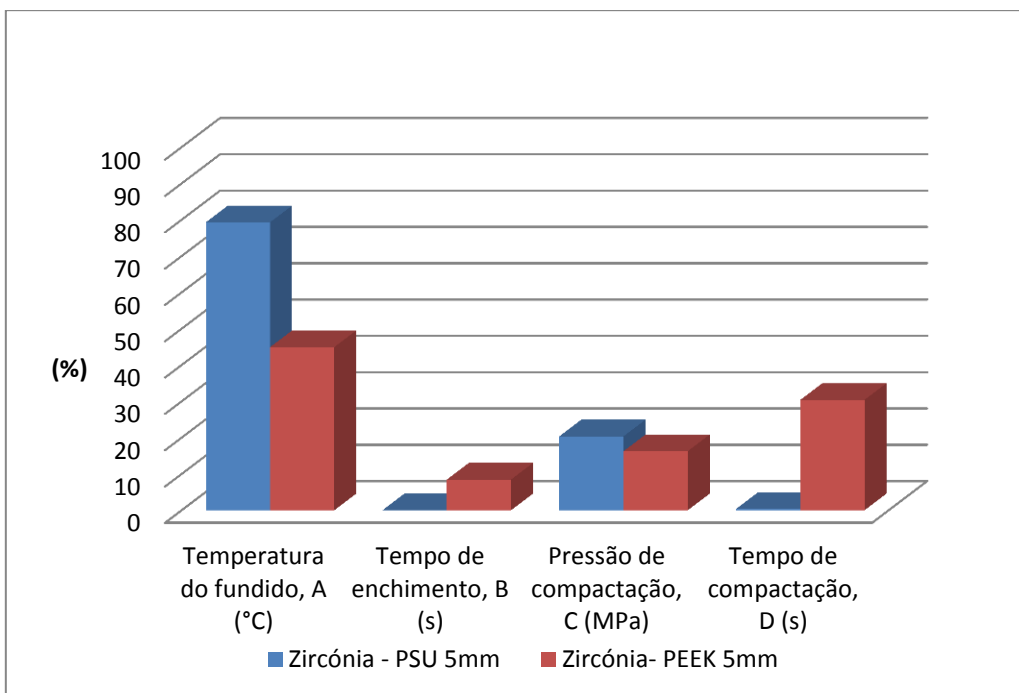


Figura 42 - Influência dos parâmetros de processamento para a interface Zircónia/PSU e Zircónia/PEEK (5mm).



Pela análise das figuras 37 a 42 é possível depreender que para espessuras de termoplástico menores, a pressão de compactação desempenha um papel fundamental na redução dos valores de deflexão. À medida que a espessura de termoplástico aumenta, a influência dos diversos fatores é menor, embora, a temperatura do fundido e a pressão de compactação tenham um papel determinante na redução das deflexões e conseqüentemente nas contrações ao longo do comprimento dos modelos em análise.

Através da análise das figuras 37 a 42 é ainda possível perceber que os perfis de influência dos fatores de processamento, não variam significativamente entre os dois tipos de materiais cerâmicos utilizados (Alumina A-960® e Zircónia Z-507®), provando o que se poderia antever de algum modo, tendo em conta o facto de haver pouca variabilidade intrínseca aos dois materiais em análise, nomeadamente no que às suas propriedades termomecânicas diz respeito.

## **4.2. Deflexões**

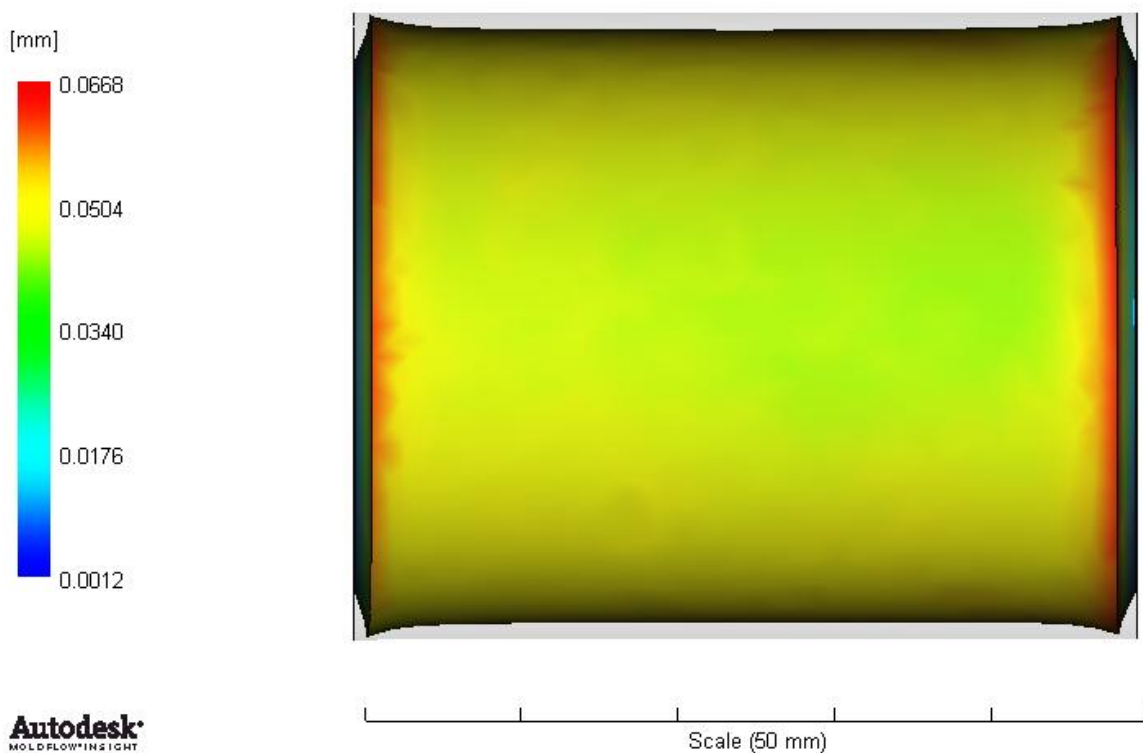
Através da utilização da ferramenta DOE, mais especificamente do método de Taguchi, foi possível determinar os parâmetros de processamento mais indicados, tendo em vista a redução da deflexão dos modelos em estudo.

Os resultados apresentados de seguida nas secções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 são fruto da aplicação dos parâmetros considerados ideais, para as diversas interfaces e condições testadas, nomeadamente no que diz respeito ao aquecimento dos insertos antes da sobremoldação, bem como à introdução de entalhes nos mesmos. Deste modo, é possível efetuar uma análise detalhada e perceber quais as interfaces mais vantajosas para a produção do modelo em estudo. Para analisar, com maior precisão, os resultados decorrentes das simulações executadas através do AMI® procedeu-se analogamente ao que tinha sido feito anteriormente em relação ao método de Taguchi. Assim, foram analisados em cada modelo 12 nós correspondentes a 3 planos equidistantes (figuras 34 e 35). Os nós utilizados para análise dos estudos de deflexão

com e sem aquecimento de insertos e com introdução de entalhes podem ser consultados nas tabelas 16 e 17 apresentadas em anexo.

Pela análise da figura 43 pode ver-se claramente a tendência geral no que à análise de empenos diz respeito. É notória a deflexão existente, embora neste caso específico, o estudo exemplificado seja um inserto de alumina sobremoldado por termoplástico PSU com 3mm de espessura. É importante referir, que a escala da figura foi ampliada vinte vezes de modo a permitir uma melhor visualização do comportamento do modelo relativamente ao aparecimento de empenos e sua localização.

Deflection, all effects:Deflection  
Scale Factor = 20.00



**Autodesk**  
MOLDFLOWINSIGHT

**Figura 43 – Exemplo da deformação do modelo com inserto de alumina e espessura de PSU de 3mm com fator de escala 20.**

### 4.2.1. Deflexões mínimas nas diferentes interfaces

Nesta secção são apresentados os resultados relativos às interfaces alumina/PSU, alumina/PEEK, zircónia/PSU e zircónia/PEEK. Numa primeira fase é feita uma comparação das diferentes interfaces com base nas cinco espessuras distintas de sobremoldação (figuras 44 a 48). De seguida são comparados os resultados relativos às diversas espessuras (figuras 49 a 52).

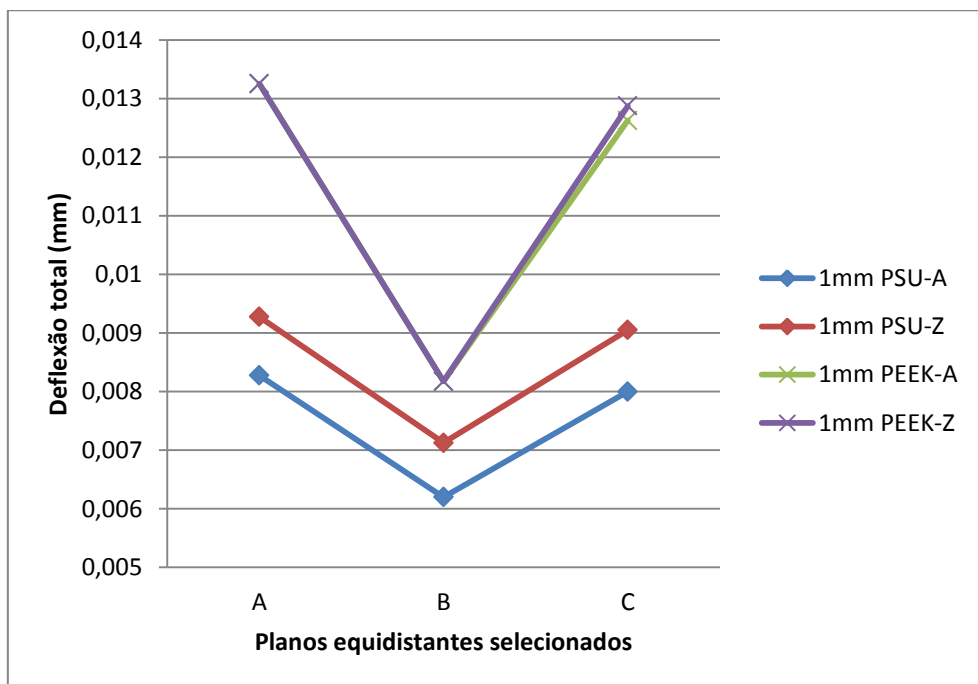


Figura 44 – Deflexões totais mínimas para modelos com 1mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia.

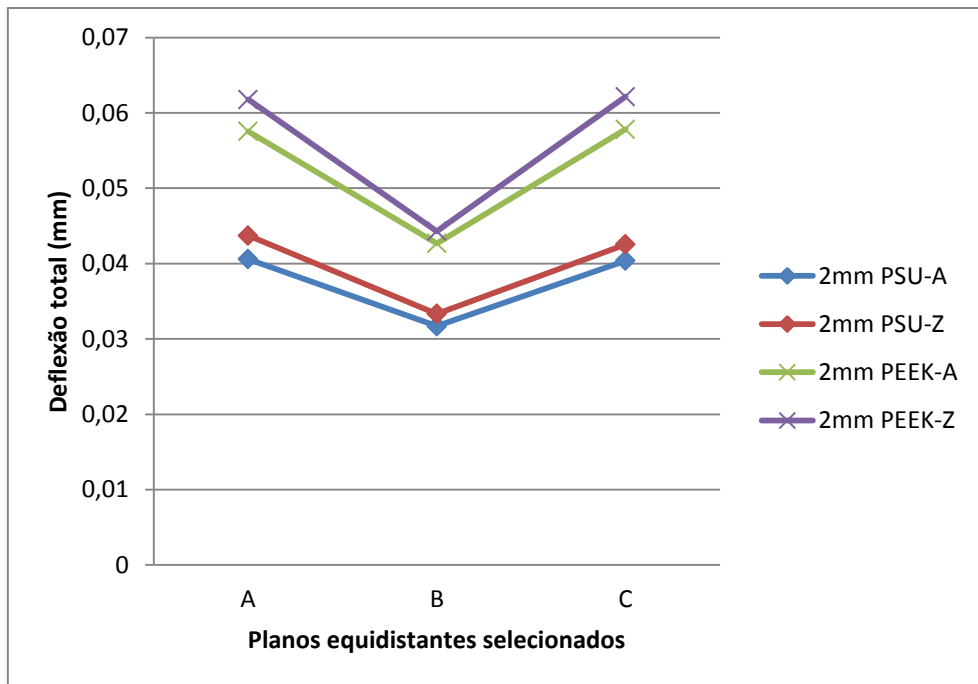


Figura 45 - Deflexões totais mínimas para modelos com 2mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia.

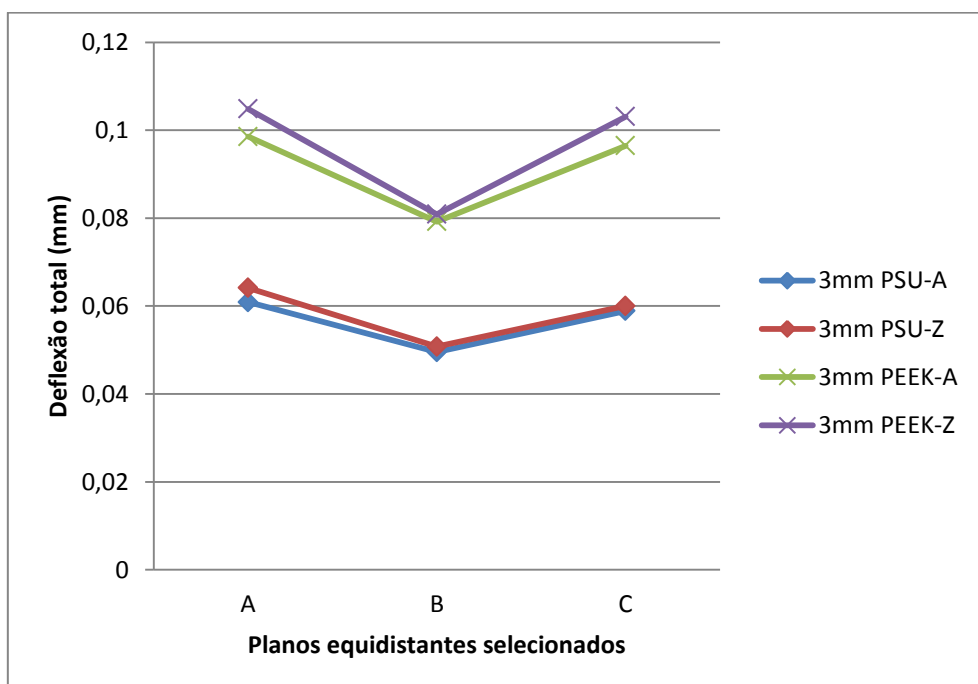


Figura 46 – Deflexões totais mínimas para modelos com 3mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia.

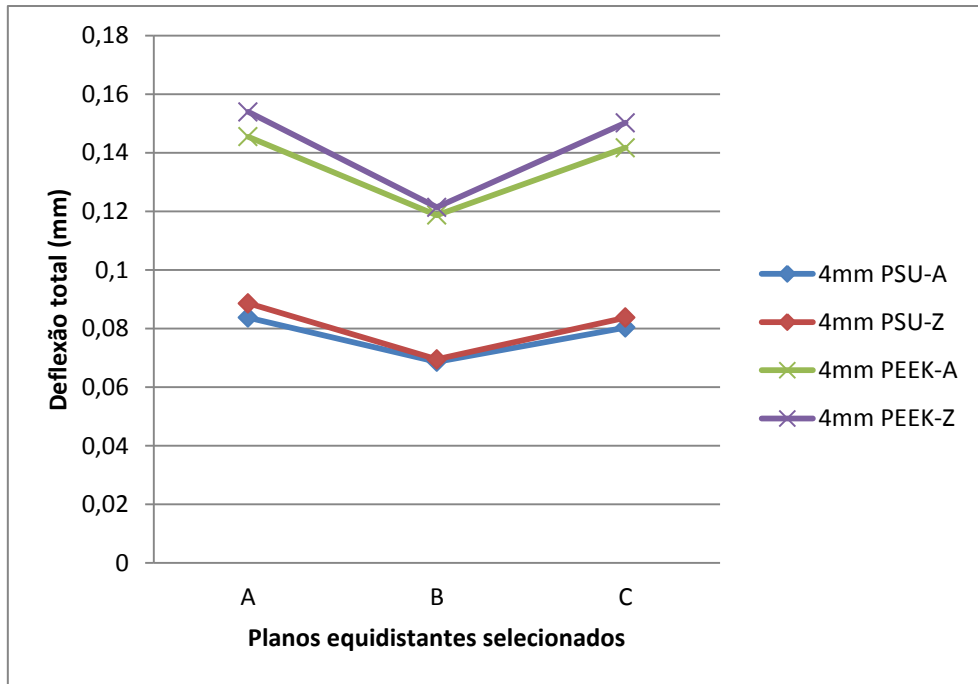


Figura 47 - Deflexões totais mínimas para modelos com 4mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia.

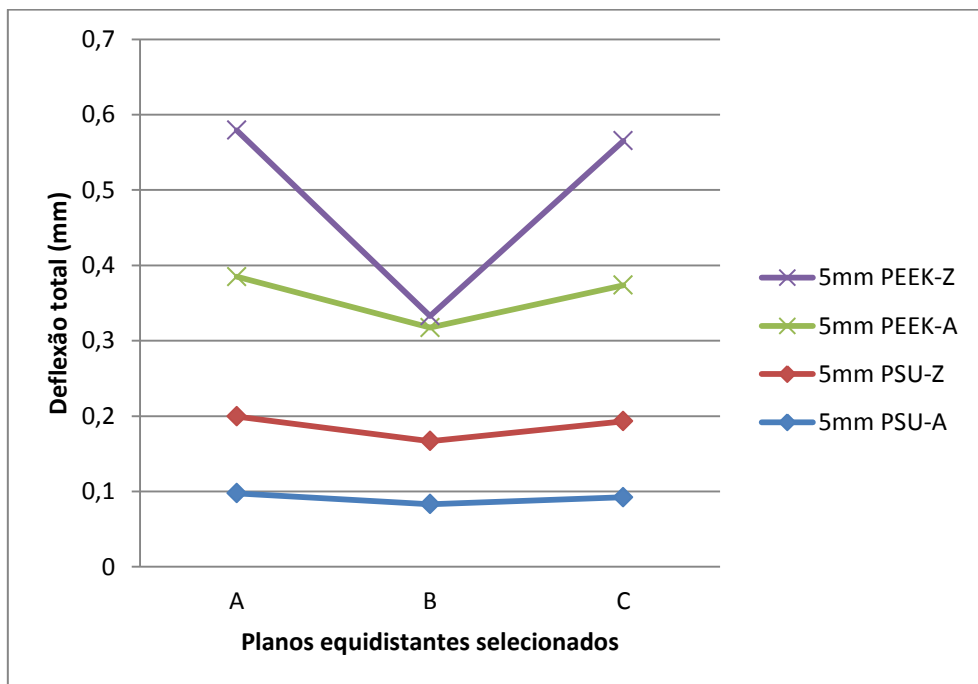


Figura 48 - Deflexões totais mínimas para modelos com 5mm de espessura de termoplástico na presença de insertos de alumina e zircónia.

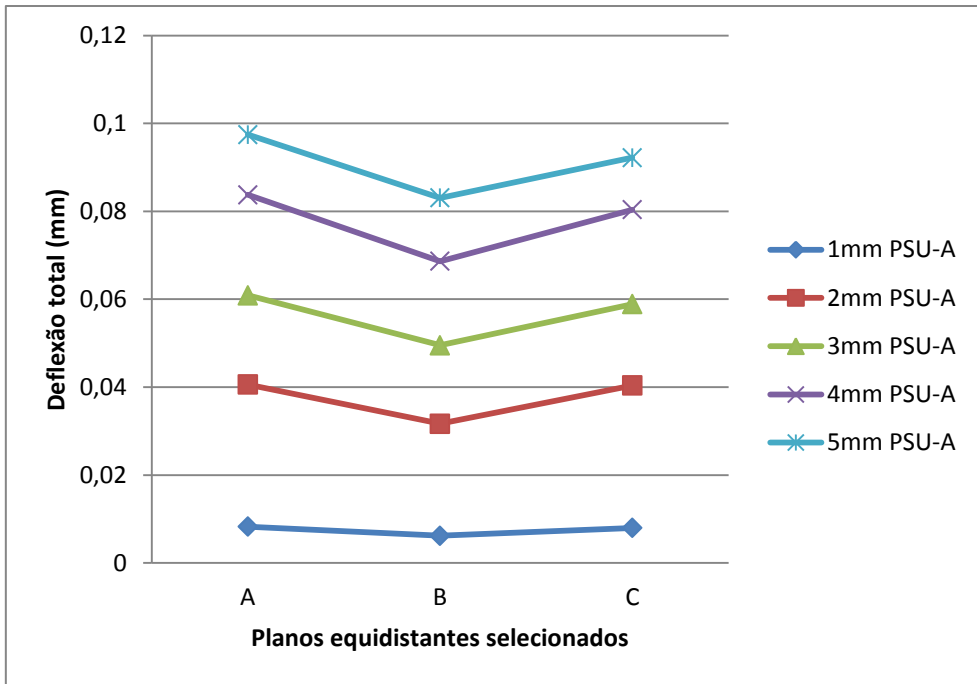


Figura 49 - Deflexões totais mínimas do termoplástico PSU para modelos com inserto de alumina.

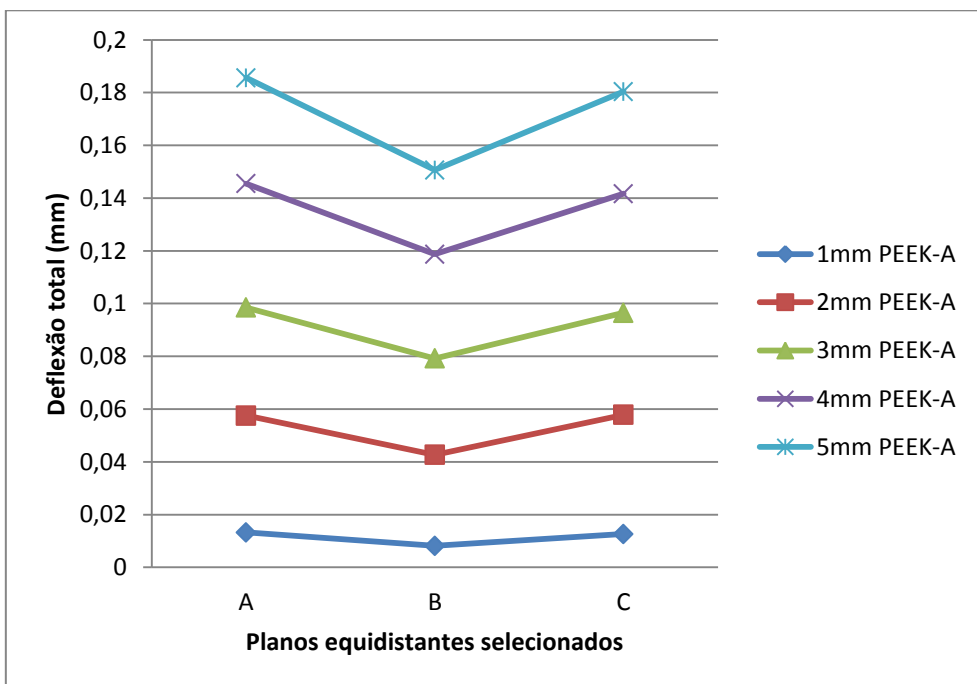


Figura 50 - Deflexões totais mínimas do termoplástico PEEK para modelos com inserto de alumina.

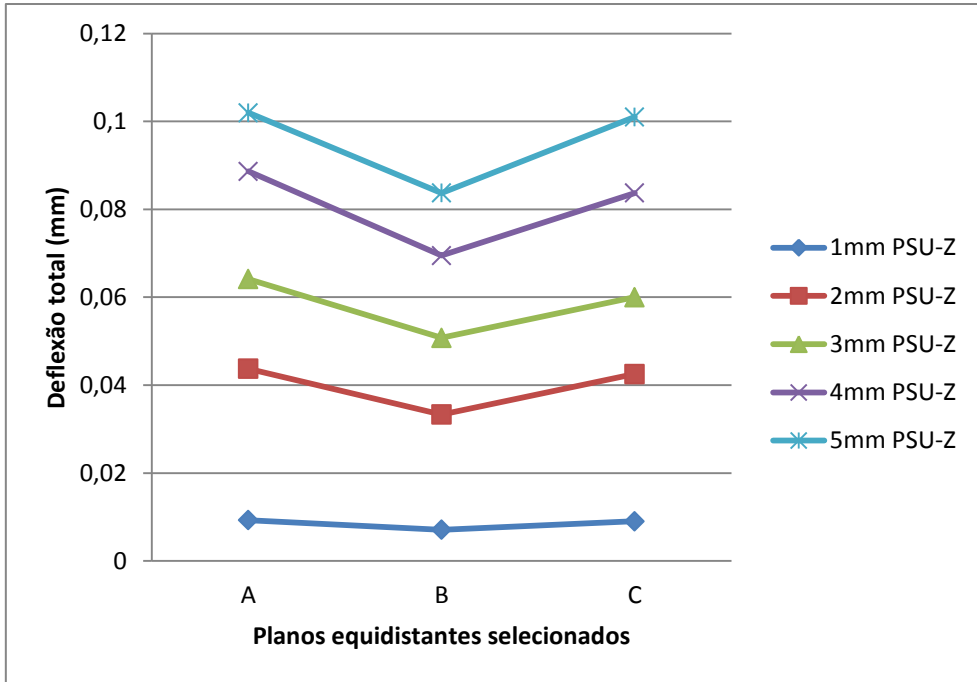


Figura 51 - Deflexões totais mínimas do termoplástico PSU para modelos com inserto de zircónia.

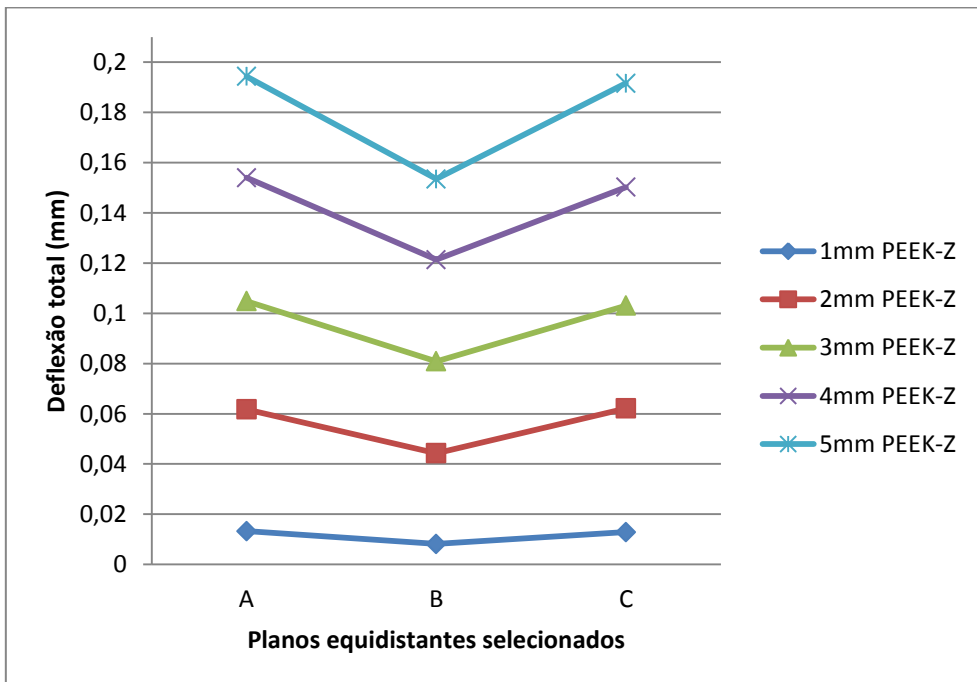


Figura 52 - Deflexões totais mínimas do termoplástico PEEK para modelos com inserto de alumina.

Através da observação dos gráficos anteriores é possível concluir que a deflexão nos modelos aumenta, à medida que a espessura de termoplástico aumenta. A deflexão nos modelos com 1 mm de espessura de termoplástico é cerca de 10 vezes inferior à dos modelos com 5 mm de espessura. Algo que não deixa de ser espectável uma vez que para espessuras de termoplástico superiores, a acomodação e relaxação de tensões induzidas pelo escoamento é menos eficaz, permitindo maior variabilidade dimensional.

Já no que diz respeito aos materiais cerâmicos utilizados (Alumina A-960® e Zircónia Z-507®) é possível verificar que os insertos de Alumina proporcionam deflexões menos acentuadas em todas as interfaces, bem como valores de deflexão mais constantes ao longo do comprimento dos modelos. Tal, pode ser justificado pelo facto de a Zircónia ter uma condutividade térmica ( $k=2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) mais baixa do que a Alumina ( $k=25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), atuando assim como um isolador térmico.

No caso do estudo [12] apresentado anteriormente, a diferença entre os CET do polímero e do inserto era bastante elevada, originando elevados valores de deflexão devido às tensões residuais induzidas pelo escoamento, agravadas pelo constrangimento mecânico causado pelo inserto.

Neste caso, visto que as diferenças entre CET são significativamente menores, julga-se que as tensões residuais existentes resultam essencialmente do arrefecimento não uniforme da peça, visto que de um lado tem um material mais condutor do que do outro. Daí, os resultados serem melhores com a alumina que tem um  $k$  (condutividade térmica) mais próximo do P-20 (material da ferramenta moldante).

De modo a compreender os efeitos inerentes a este estudo em particular não foram utilizados canais de arrefecimento ou outro sistema de controlo de temperatura uma vez que os mesmos poderiam mascarar os efeitos relatados anteriormente. No entanto, pode concluir-se que o projeto assertivo deste sistema da ferramenta moldante, em muito poderia beneficiar o produto final.

Em relação aos termoplásticos utilizados, é notório que a polisulfona (PSU) de composição amorfa proporciona valores de deflexão inferiores ao polieteretercetona (PEEK) em todas as condições analisadas. É do conhecimento geral que há uma maior repetição das unidades ao longo das cadeias moleculares no caso dos termoplásticos



semicristalinos, de tal forma que inibem a relaxação de tensões induzidas pelo escoamento, são mais suscetíveis às condições de processamento e mais instáveis do ponto de vista dimensional.

#### 4.2.2. Aquecimento de insertos

Através dos resultados apresentados nesta secção é possível analisar a influência do aquecimento dos insertos na deflexão final do modelo. Assim, são apresentados nas figuras 53 a 58 os resultados de deflexão dos modelos com 1, 3 e 5 mm de espessura, para insertos de alumina com temperaturas de 50, 100, 150 e 200 °C.

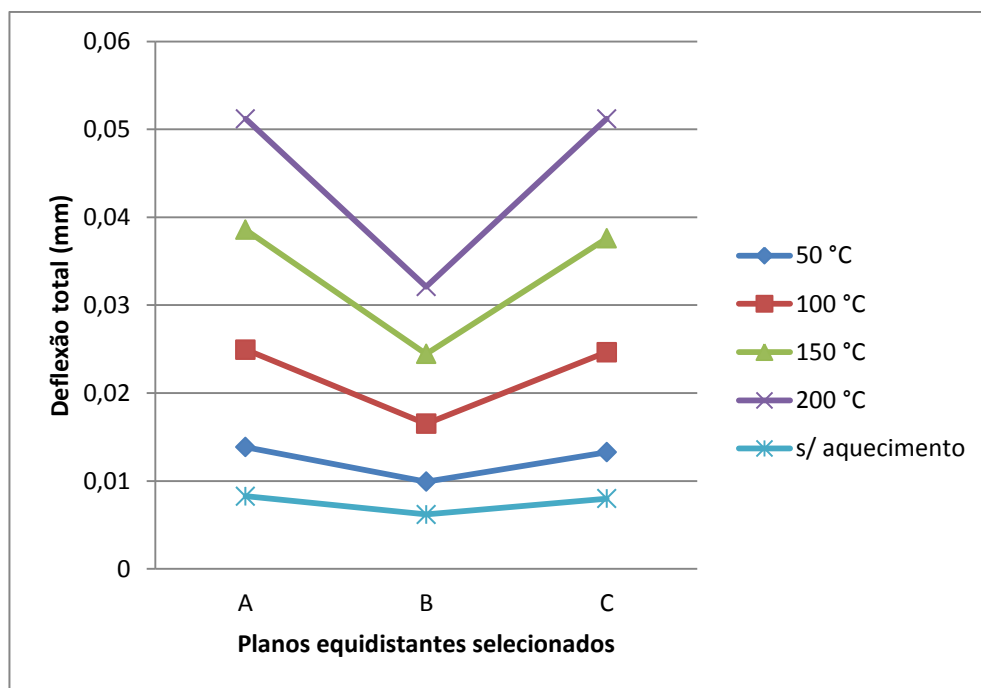


Figura 53 – Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PSU.

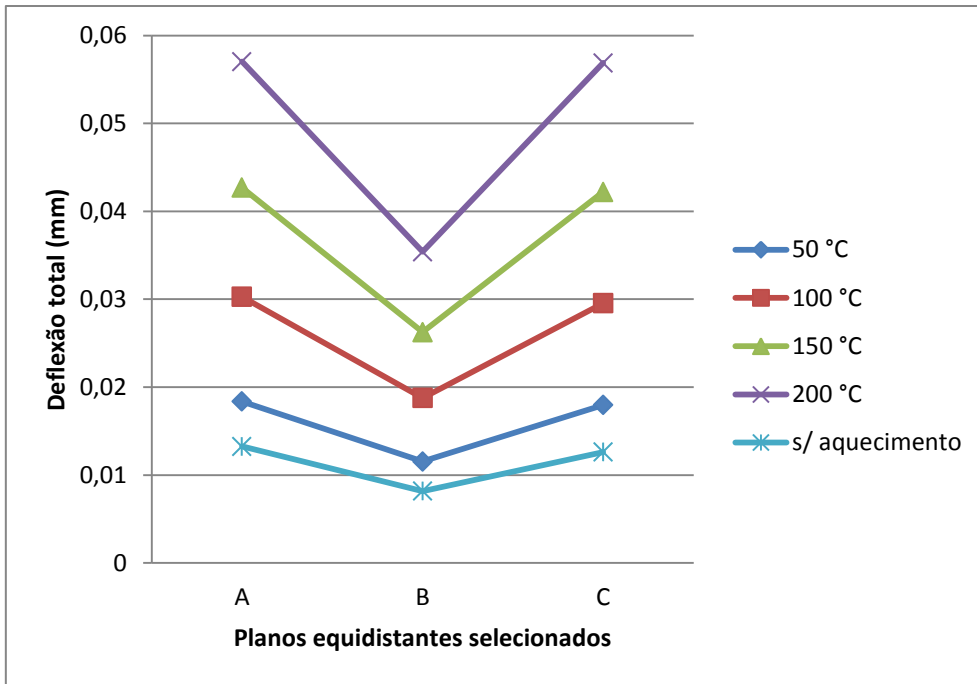


Figura 54 - Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PEEK.

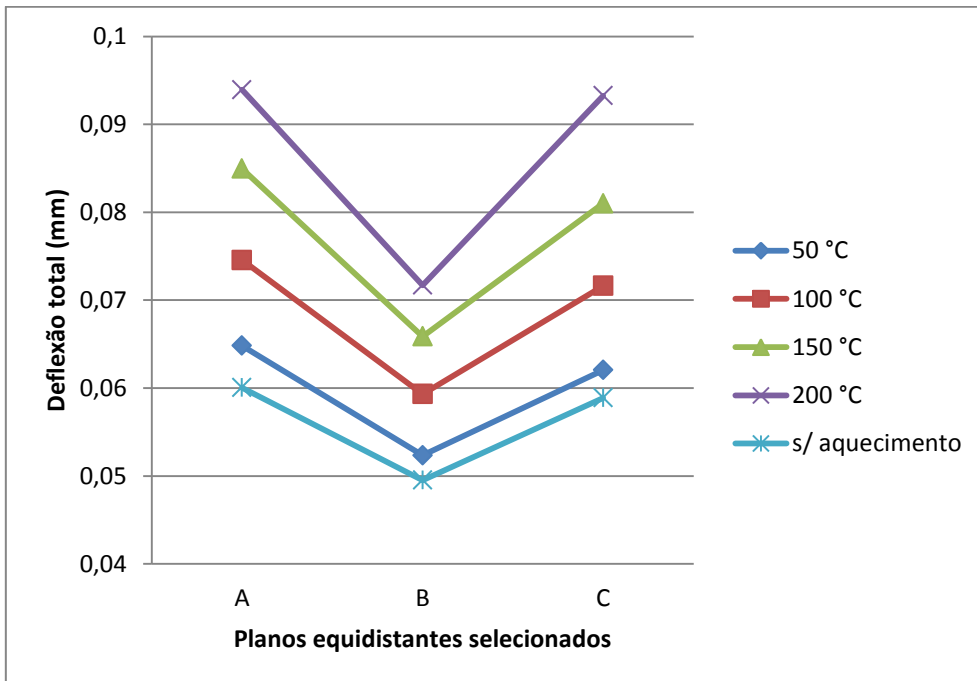


Figura 55 - Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PSU.

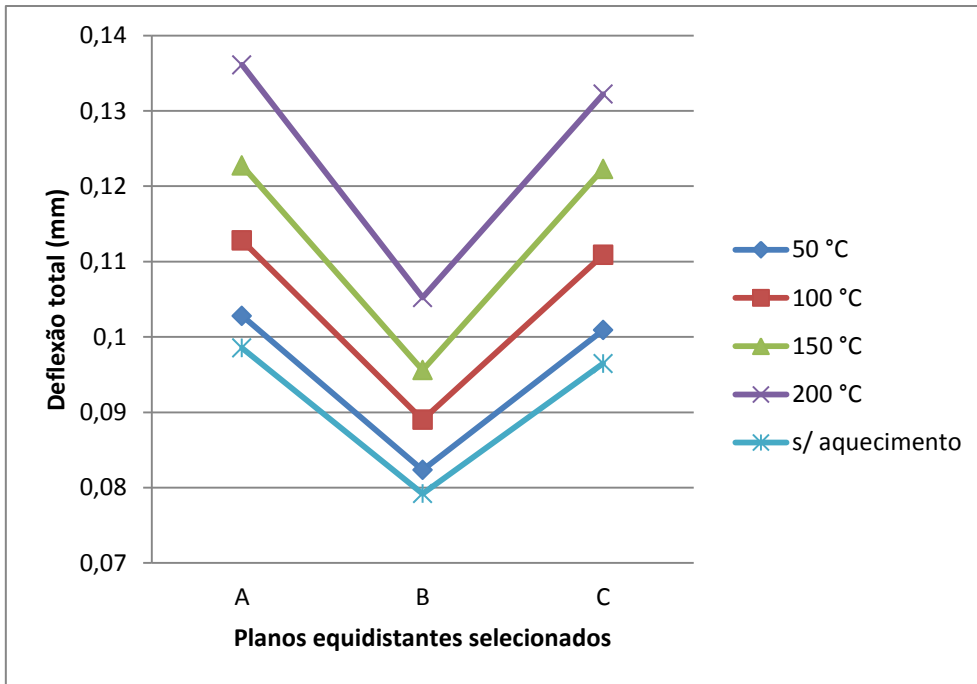


Figura 56 - Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PEEK.

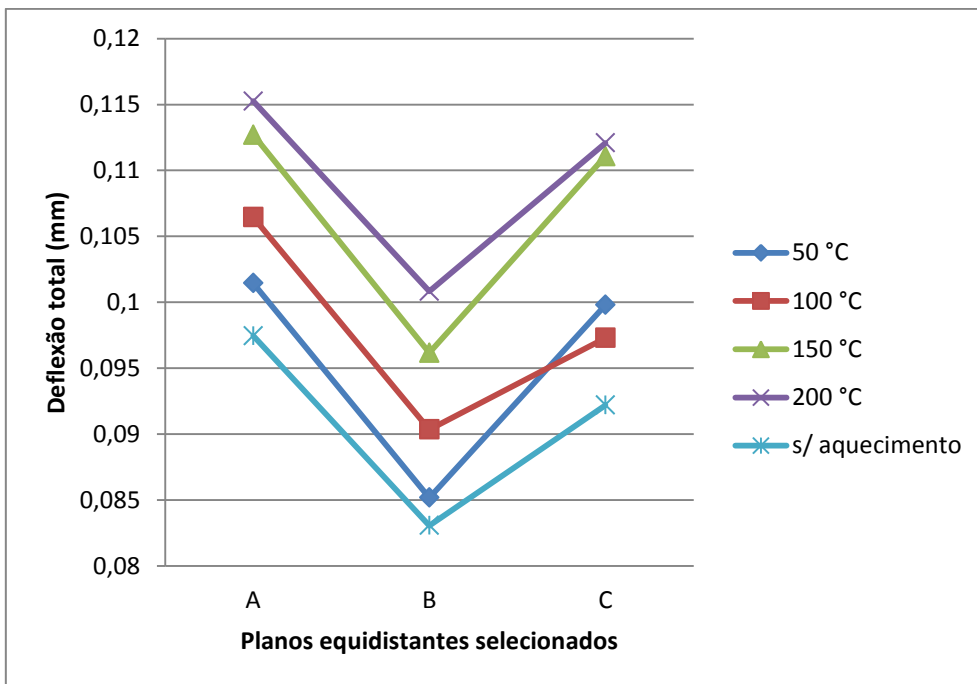


Figura 57 - Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PSU.

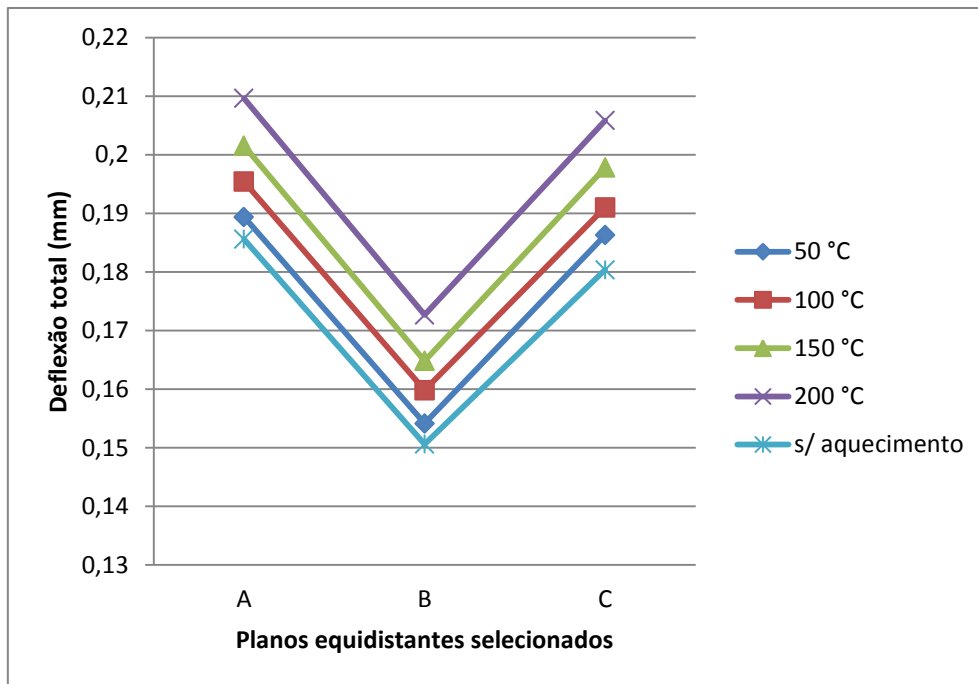


Figura 58 - Influência do aquecimento dos insertos de alumina na deflexão dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PEEK.

Tendo em conta os gráficos apresentados nas figuras anteriores, é facilmente identificada a inutilidade de aquecimento dos insertos neste caso em particular. Para todas as espessuras apresentadas (1, 3 e 5mm) o aquecimento de insertos a 50, 100, 150 e 200°C resulta num aumento da deflexão total dos modelos. Este aumento é gradual, ou seja, é consistente com o aumento da temperatura do inserto. Em todos os gráficos foram incluídos os valores de deflexão para insertos à temperatura ambiente, o que torna bastante visível que o aquecimento dos mesmos não representa mais valia na redução de deflexões, nos casos em estudo. De modo a ter uma melhor perceção dos efeitos provocados pelo aumento da temperatura dos insertos são apresentadas, abaixo, as figuras 59 a 64 com mapeamento de cores relativos à deflexão dos modelos para espessuras de 1, 3 e 5 mm e temperaturas de inserto de 50 e 200°C.

Através da visualização das mesmas é possível verificar que com o aumento da temperatura dos insertos, os valores de deflexão globais aumentam para os todos os casos apresentados, bem como a área dos mesmos. Ou seja, nas figuras referentes ao aquecimento dos insertos a 50°C é possível observar um padrão de deflexões bastante

mais constante ao longo do comprimento dos modelos do que no caso dos insertos aquecidos a 200 °C. Este comportamento acentua-se gradualmente dos 50 aos 200 °C.

Deste modo, é possível compreender que o aquecimento dos insertos antes da sua sobremoldação não é uma hipótese viável, visto aumentar os custos produção, inerentes ao aumento do consumo de energia, acentuando a diferença dos valores de deflexão ao longo do comprimento dos modelos, que se pretendem o mais constantes possíveis, de modo a maximizar a adesão e evitar a rutura do material, tendo em conta os requisitos funcionais do produto nas aplicações aqui equacionadas.

De algum modo seria razoável esperar que a relevância do aquecimento do inserto fosse mínima, dadas as diferenças também elas quase desprezáveis em termos de variação dos CET. Esta solução talvez apresente maiores vantagens quando se pretende promover o relaxamento de tensões residuais internas térmicas em sobremoldações com grande disparidade de coeficientes de expansão térmica, como foi constatado através do estudo [12].

Deflection, all effects:Deflection  
Scale Factor = 1.000

[mm]



Autodesk  
MOLDFLOWINSIGHT

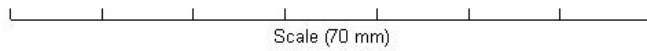
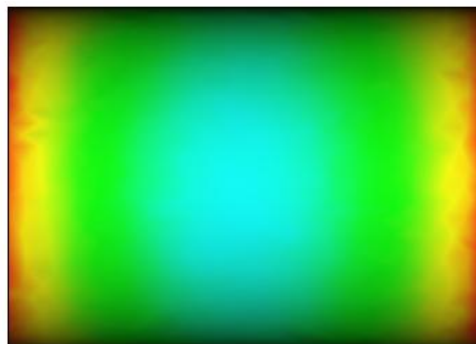


Figura 59 – Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 50°C, sobremoldado por PSU com 1mm de espessura.

Deflection, all effects:Deflection  
Scale Factor = 1.000

[mm]



Autodesk  
MOLDFLOWINSIGHT

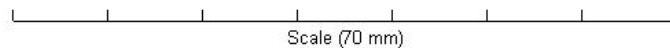


Figura 60 – Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 200°C, sobremoldado por PSU com 1mm de espessura.

Deflection, all effects:Deflection  
Scale Factor = 1.000

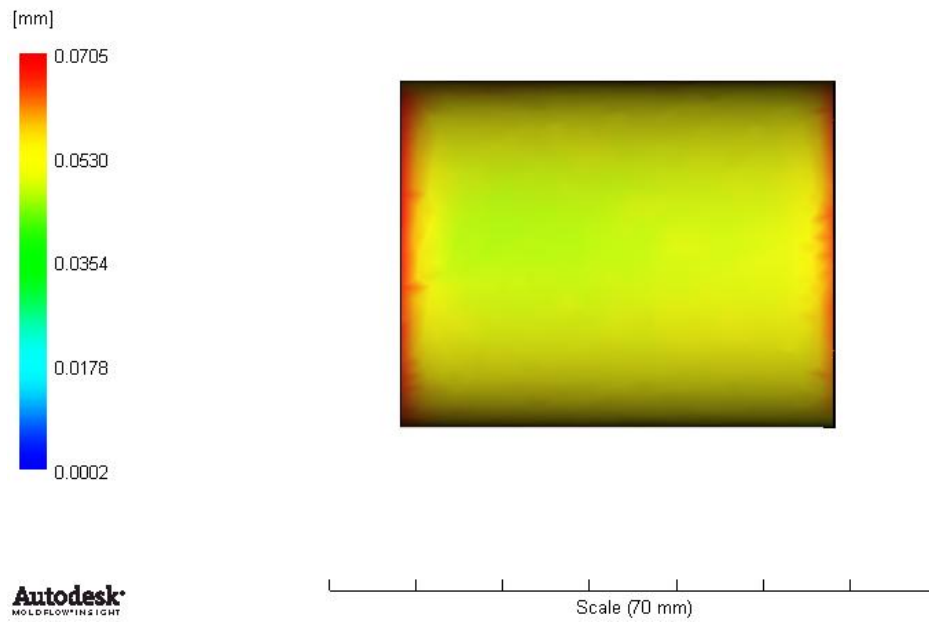


Figura 61 – Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 50°C, sobremoldado por PSU com 3mm de espessura.

Deflection, all effects:Deflection  
Scale Factor = 1.000

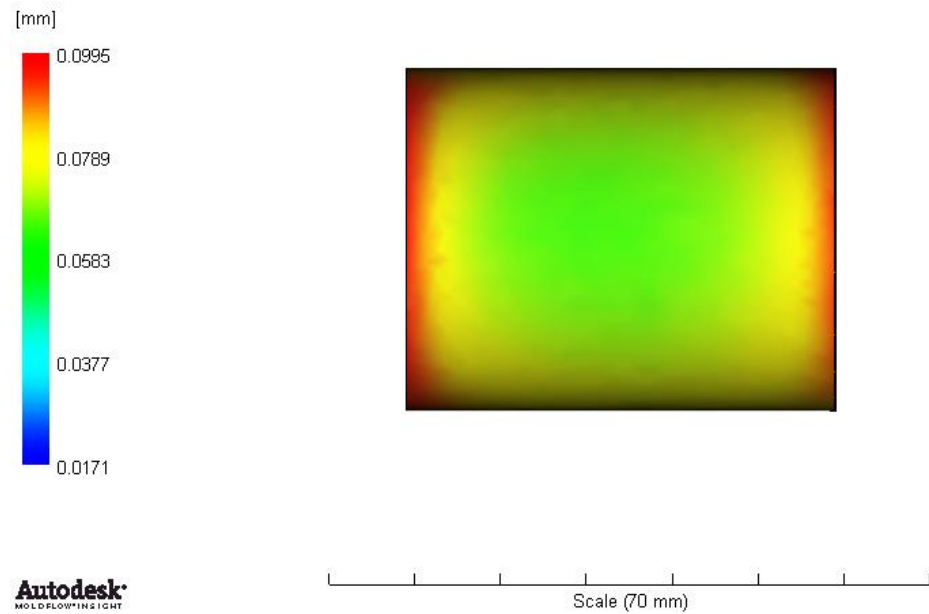


Figura 62 – Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 200°C, sobremoldado por PSU com 3mm de espessura.

Deflection, all effects:Deflection  
Scale Factor = 1.000

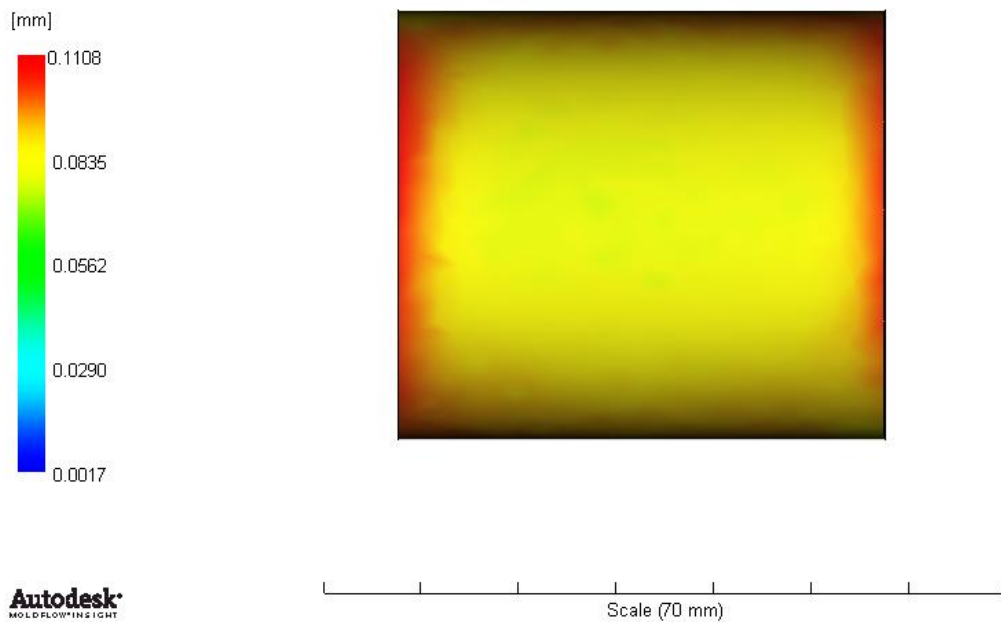


Figura 63 – Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 50°C, sobremoldado por PSU com 5mm de espessura.

Deflection, all effects:Deflection  
Scale Factor = 1.000

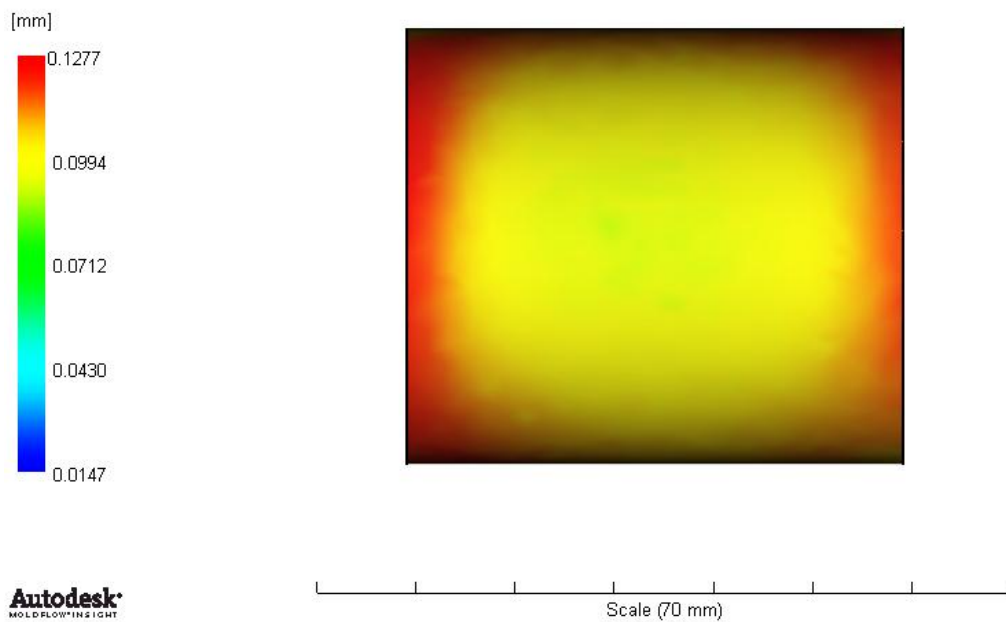


Figura 64 – Deflexão do modelo com inserto de Alumina a 200°C, sobremoldado por PSU com 5mm de espessura.



### 4.2.3. Deflexão em modelos com entalhes

A influência da introdução de entalhes nos insertos cerâmicos, bem como a sua profundidade, são alvos de estudo nesta secção.

São apresentados nas figuras 65 e 66 os resultados relativos à deflexão dos modelos com insertos de alumina sobremoldados por PSU e PEEK respetivamente, com 3 mm de espessura.

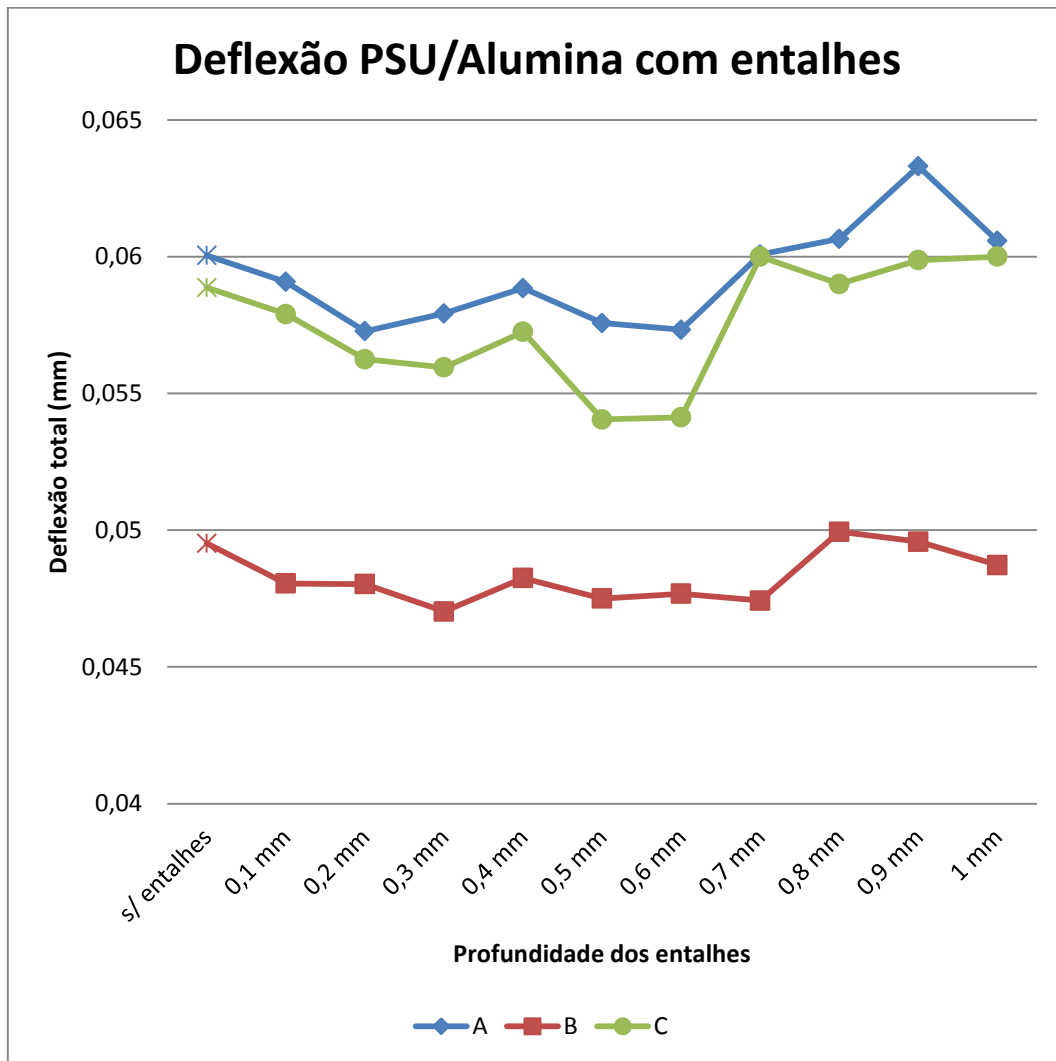


Figura 65 – Deflexão do modelo PSU/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm.

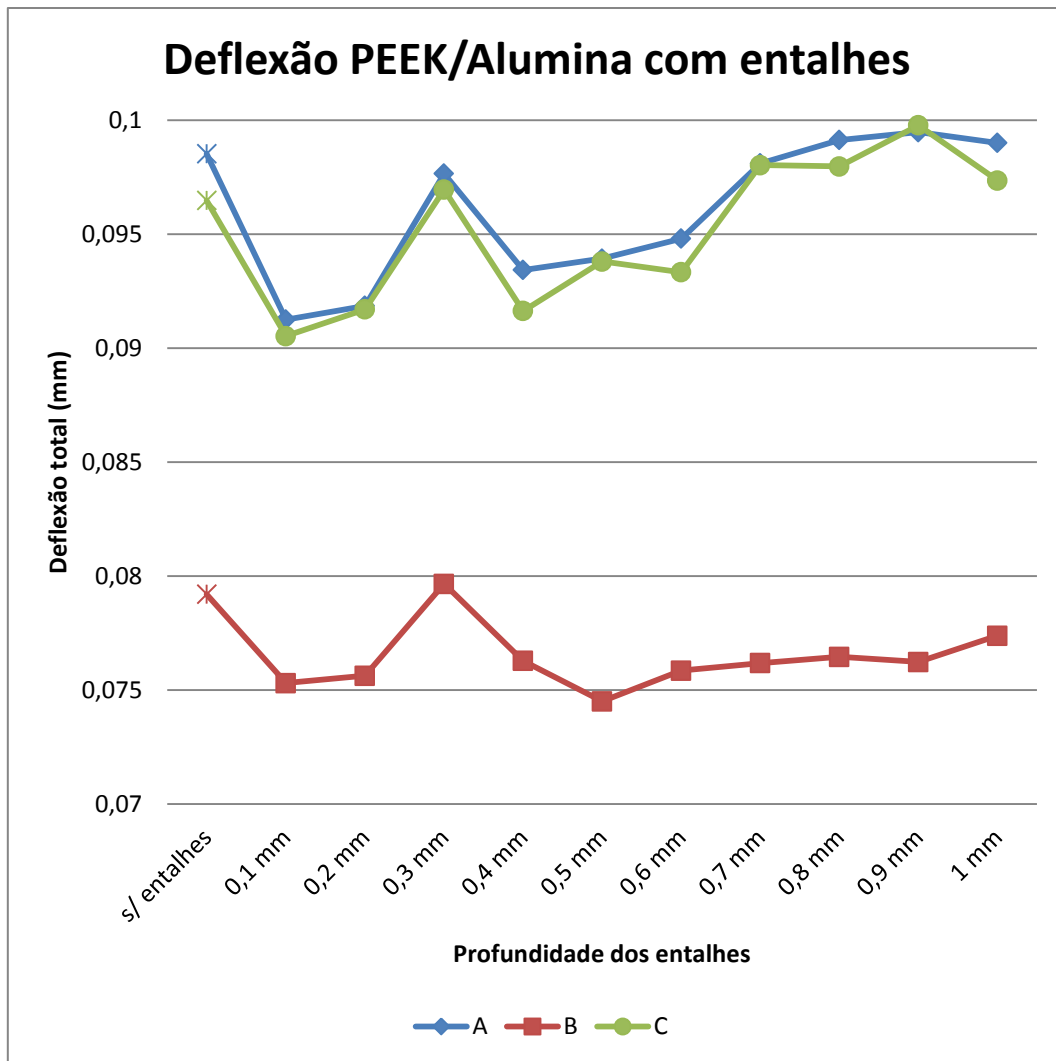


Figura 66 - Deflexão do modelo PEEK/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm.

Após a análise das duas figuras 65 e 66, é possível perceber que a introdução de entalhes tem efeitos benéficos relativamente à deflexão total dos modelos.

No caso da interface PSU/Alumina, as profundidades de entalhes de 0,1 a 0,4 mm são as mais vantajosas. De 0,5 mm de profundidade até 1mm, apesar de em algumas delas a deflexão total ser inferior do que na ausência dos mesmos, as diferenças de deflexão dos planos A e C são um pouco discrepantes, traduzindo-se numa deflexão ao longo do comprimento do modelo pouco simétrica.

Já no caso da interface PEEK/Alumina as profundidades mais vantajosas são de 0,1 a 0,6 mm. Deve, no entanto, mencionar-se que a profundidade 0,3 mm não segue a tendência, apesar de não se encontrar justificativa conveniente.

Apesar de em ambas as interfaces ser vantajosa a utilização de entalhes, tendo em vista a redução da deflexão total dos modelos, é na interface PSU/Alumina, que se verificam os melhores resultados, analogamente ao que acontecia sem a introdução de entalhes.

### 4.3. Contrações

Para executar a avaliação de resultados dos modelos no que diz respeito à contração, foram escolhidos diversos pontos, analogamente ao que tinha sido feito para as deflexões e para a otimização através da ferramenta *DOE*. Neste caso, para avaliar a contração da espessura ao longo do comprimento dos modelos foram escolhidos vinte e quatro pontos correspondentes a 3 planos equidistantes, tal como pode ser visto nas figuras 67 e 68.

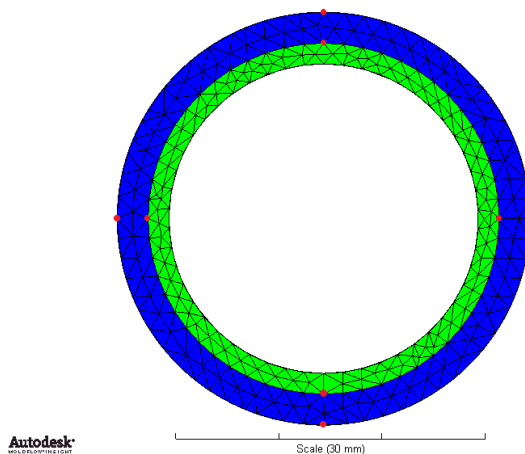


Figura 67 - Exemplo da vista frontal do modelo com espessura de termoplástico 3mm onde estão identificados os pontos escolhidos.

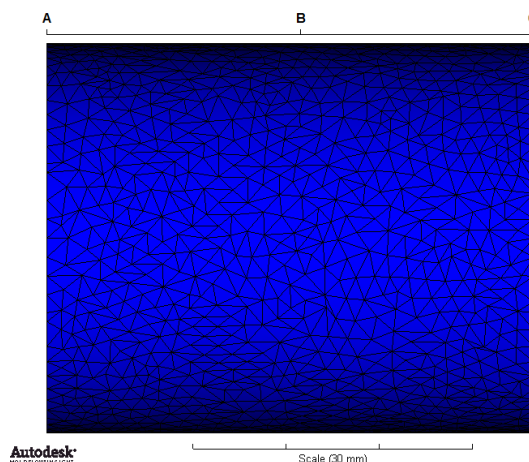


Figura 68 - Vista lateral do modelo com espessura de termoplástico 3mm sem entalhes onde estão identificados os três planos equidistantes escolhidos.

### 4.3.1. Contrações mínimas nas diferentes interfaces

Nesta secção são apresentados os resultados relativos às interfaces alumina/PSU, alumina/PEEK, zircónia/PSU e zircónia/PEEK no que diz respeito a contrações. Nas figuras 69 a 73 encontram-se os resultados da contração dos modelos tendo em conta as cinco espessuras distintas de sobremoldação e as diferentes interfaces entre material cerâmico e termoplástico.

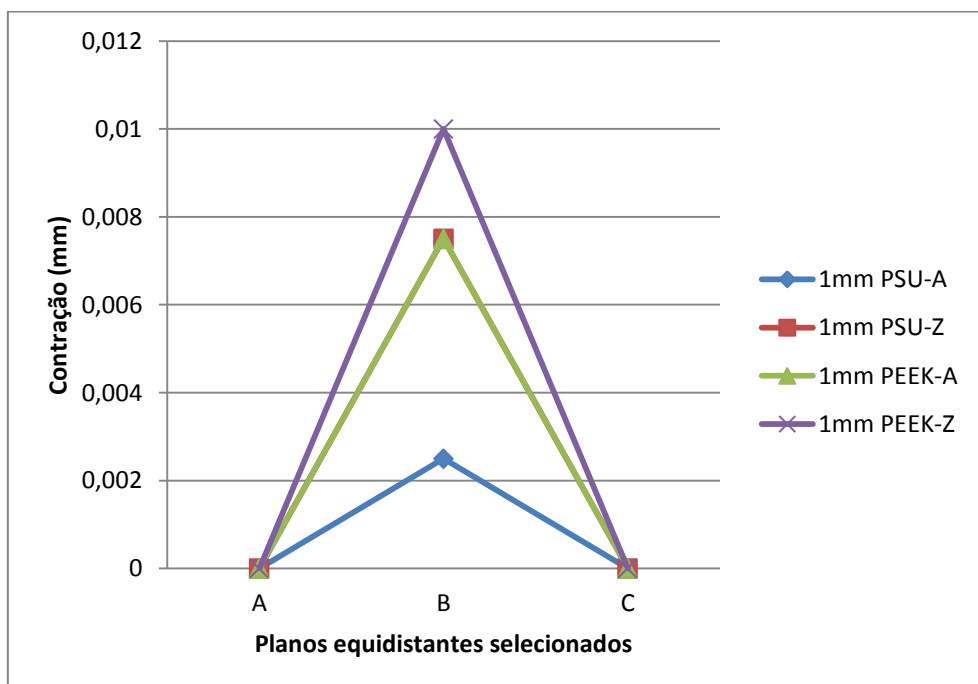


Figura 69 - Contrações para modelos com 1mm de espessura de termoplástico.

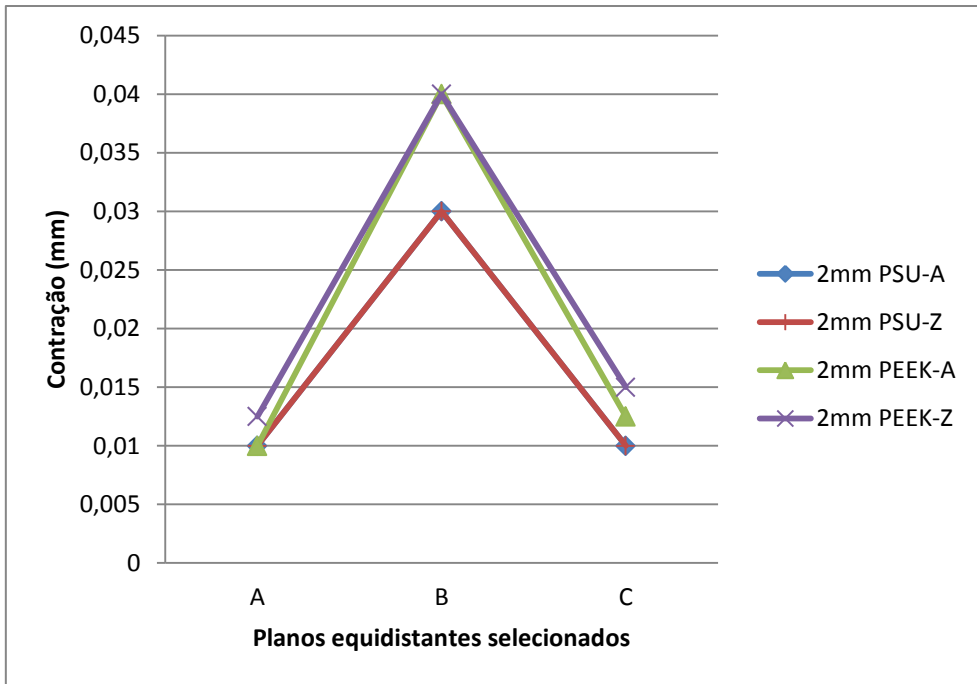


Figura 70 - Contrações para modelos com 2mm de espessura de termoplástico.

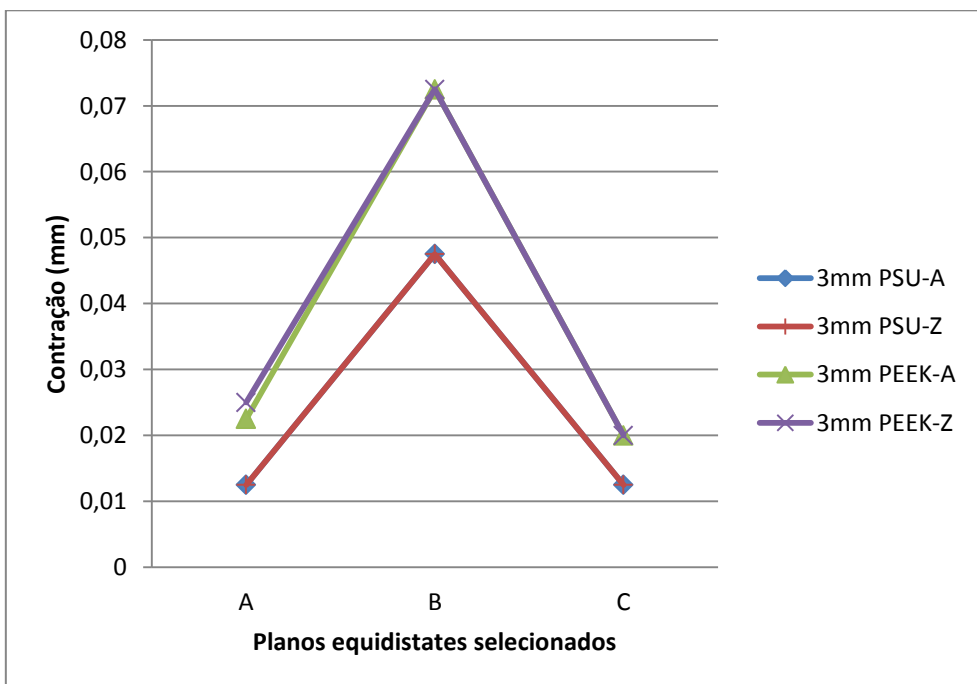


Figura 71 - Contrações para modelos com 3mm de espessura de termoplástico.

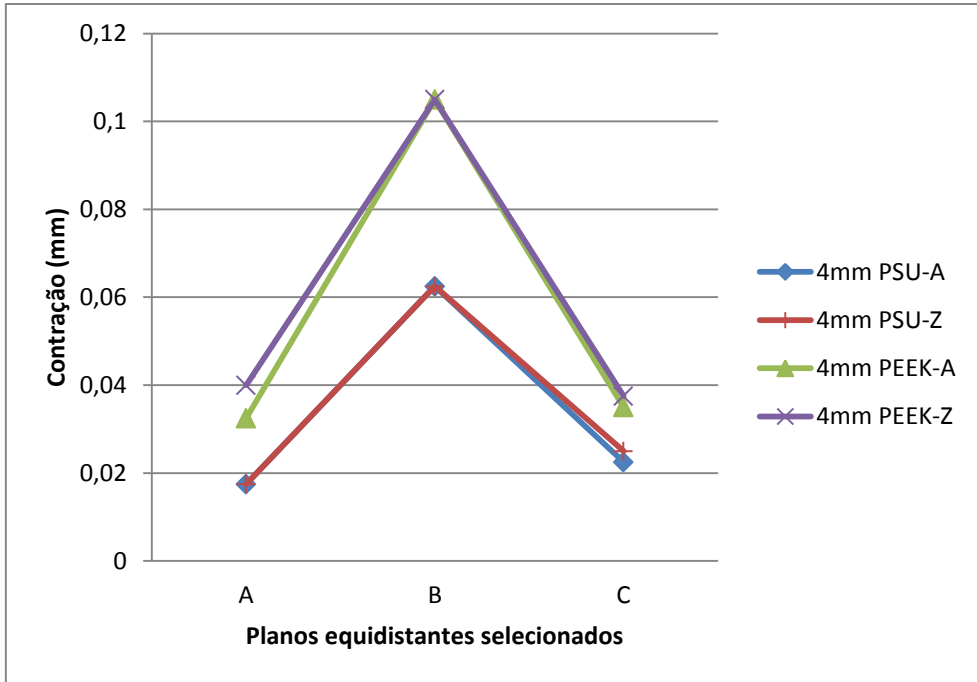


Figura 72 - Contrações para modelos com 4mm de espessura de termoplástico.

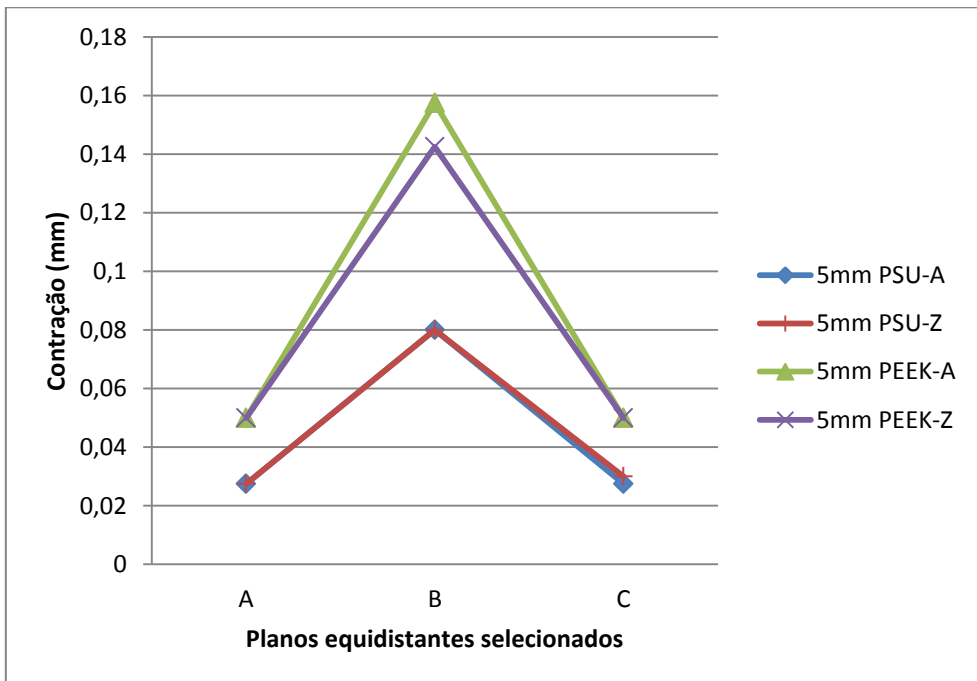


Figura 73 - Contrações para modelos com 5mm de espessura de termoplástico.

Após a análise das figuras anteriormente apresentadas, é possível identificar, que a contração diminui gradualmente do plano B (central) até aos planos A e C (plano lateral esquerdo e direito, respetivamente).

Por outro lado, é perceptível que com o aumento da espessura do termoplástico aumentam também os valores de contração de um modo geral ao longo do comprimento dos modelos. Para além disso, as interfaces que permitem a obtenção de valores mais baixos ao nível das contrações são alumina/PSU e zircónia/PSU, apesar de a diferença ser bastante ligeira, embora seja no primeiro caso que se verificam os resultados com menores valores e mais uniformes.

### **4.3.2. Contrações em modelos com aquecimento de insertos**

Tal como foi feito anteriormente no caso das deflexões, também ao nível das contrações se pretende perceber qual a influência do aquecimento dos insertos. Para tal, foram registados os valores de contração dos modelos nas interfaces alumina/PSU e alumina/PEEK que anteriormente tinham sido identificadas como as mais vantajosas.

Nas figuras 74 a 79 é feita a comparação dos modelos referidos para espessuras de 1, 3 e 5 mm de termoplástico. Em cada figura é feita a comparação de cada modelo com aquecimento dos insertos a 50, 100, 150 e 200 °C.

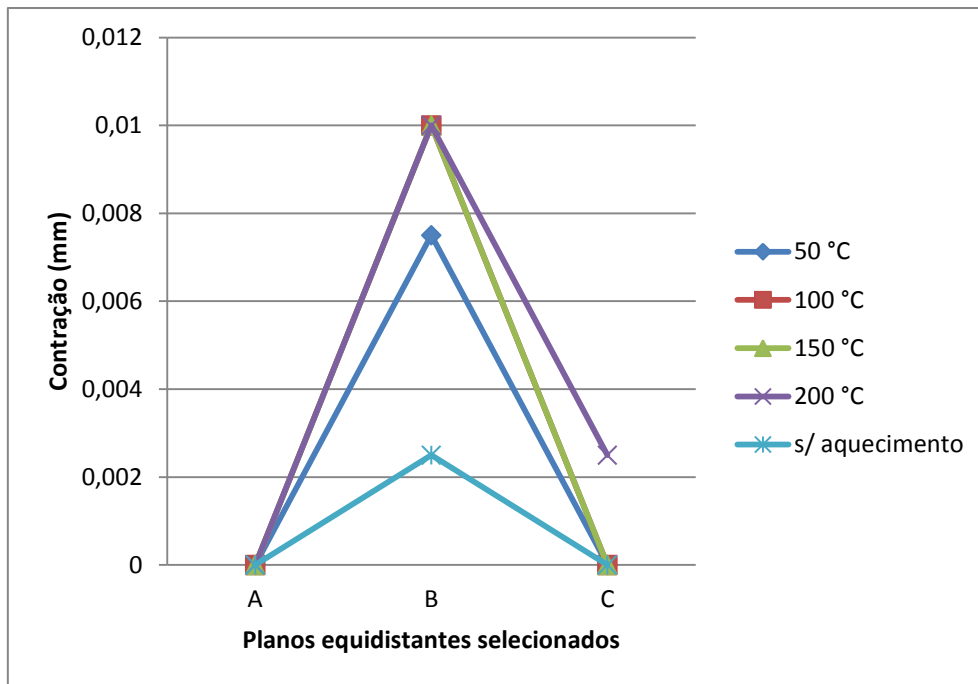


Figura 74 – Influência do aquecimento dos inserts de alumina na contração dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PSU.

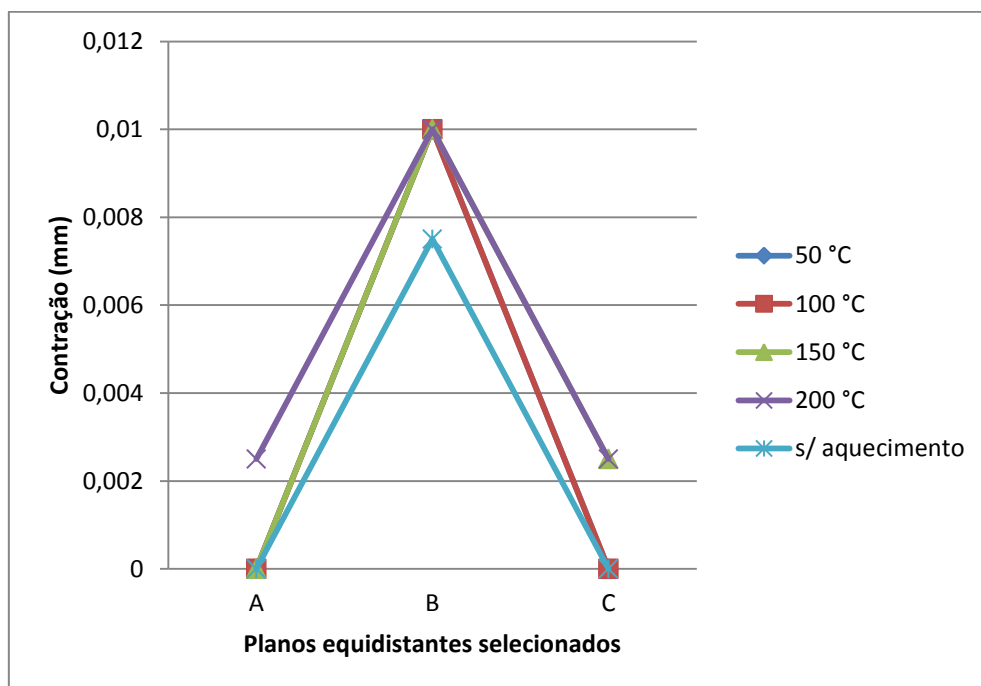


Figura 75 – Influência do aquecimento dos inserts de alumina na contração dos modelos de 1mm de espessura de termoplástico PEEK.



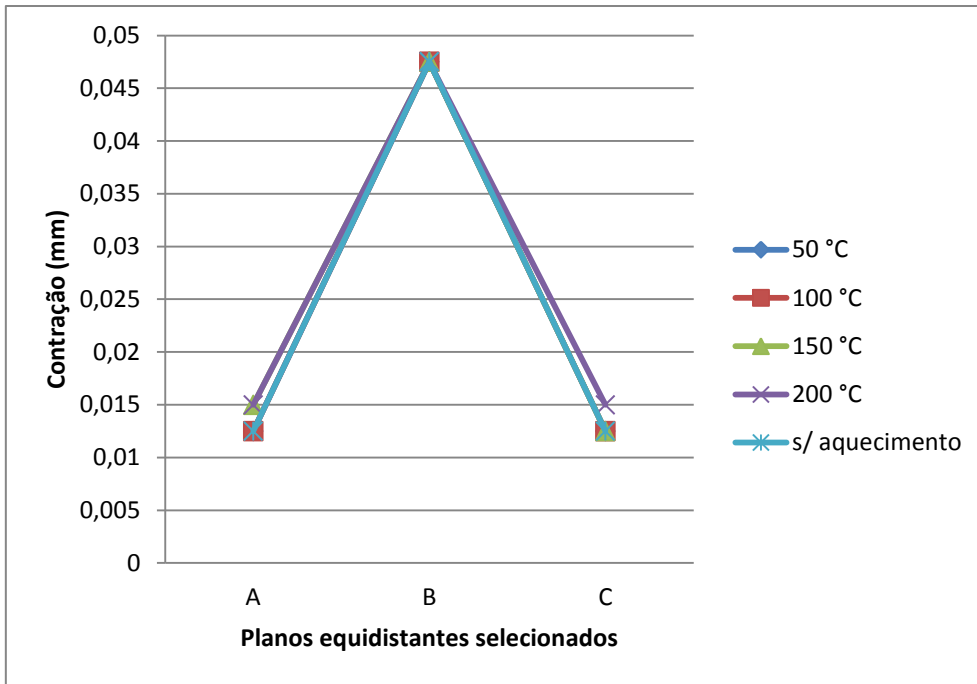


Figura 76 – Influência do aquecimento dos inserts de alumina na contração dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PSU.

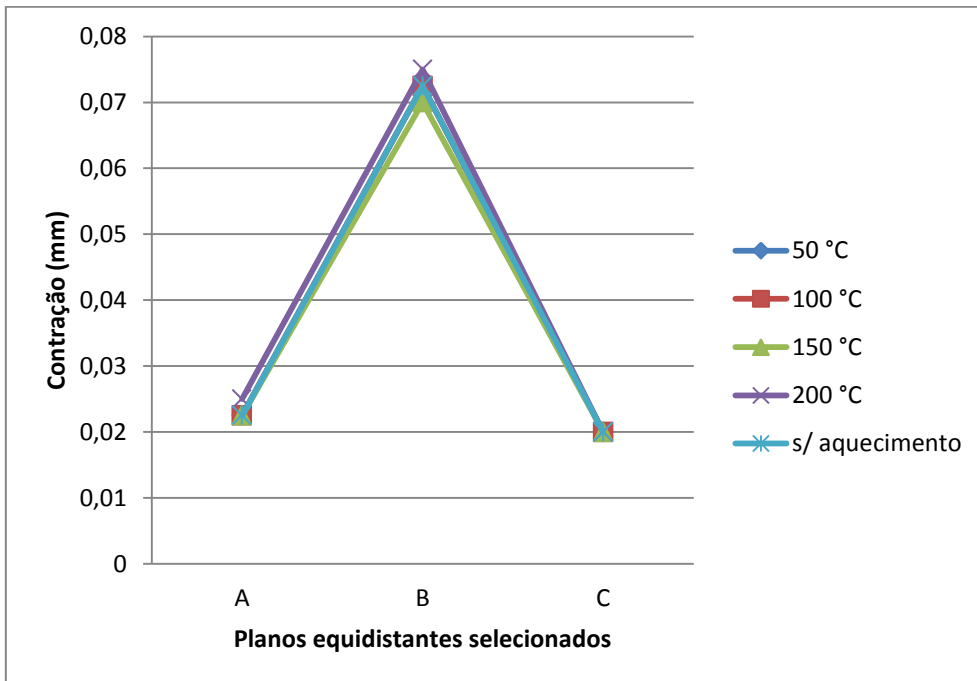


Figura 77 - Influência do aquecimento dos inserts de alumina na contração dos modelos de 3mm de espessura de termoplástico PEEK.

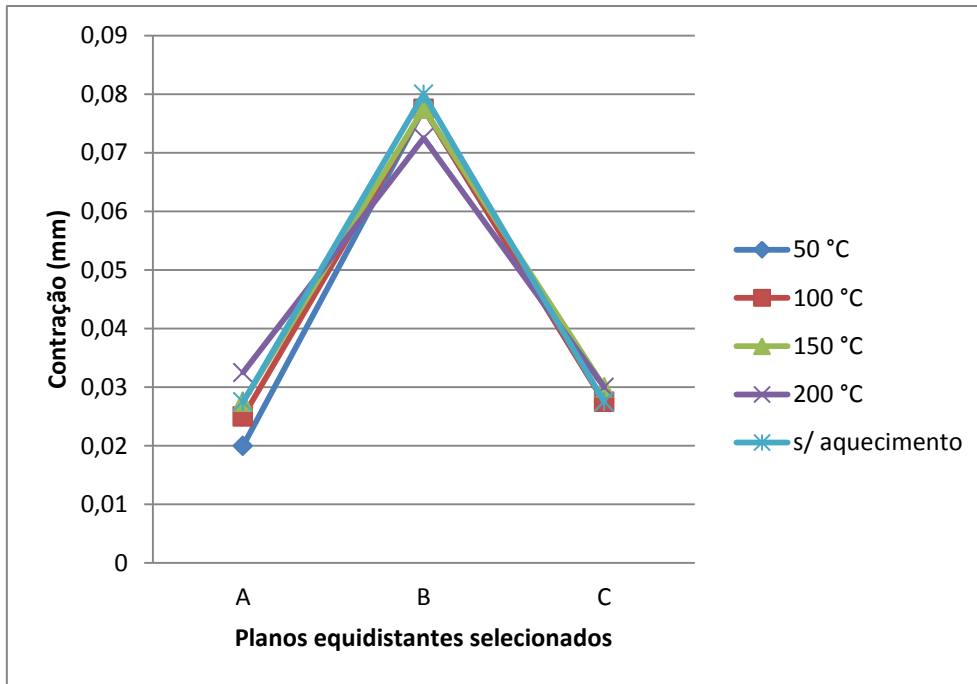


Figura 78 - Influência do aquecimento dos inserts de alumina na contração dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PSU.

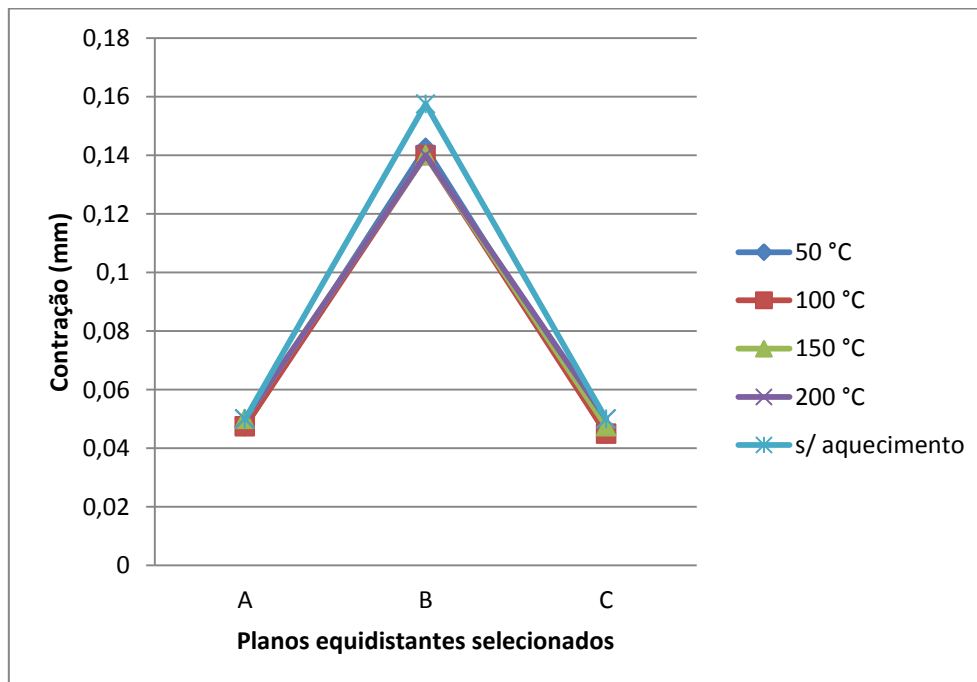


Figura 79 - Influência do aquecimento dos inserts de alumina na contração dos modelos de 5mm de espessura de termoplástico PEEK.

Também ao nível das contrações, à semelhança do que acontecia nas deflexões, e como seria espectável, o aquecimento dos insertos não apresenta vantagens na maioria dos casos, e quando apresenta, as mesmas são pouco significativas. No entanto, é de salientar que o aquecimento dos insertos tem influência para espessuras de termoplástico superiores. Como se pode ver nas figuras, para espessuras de 1mm é bastante evidente que o aquecimento dos mesmos resulta num aumento da contração nas zonas centrais dos modelos. Já nos casos em que a sobremoldação tem 3 mm de espessura, os resultados com e sem aquecimento de inserto são bastante similares. Por fim, para espessuras de 5mm já se conseguem identificar algumas melhorias nas contrações registadas, facto que é consistente com as melhorias inerentes à homogeneidade da taxa de transferência de calor induzida pelo aquecimento do inserto.

### **4.3.3. Contrações em modelos com entalhes**

Por último, nesta secção pretende-se descobrir qual o efeito da introdução de entalhes nos insertos cerâmicos, relativamente aos valores de contração registados nos modelos testados. São apresentados nas figuras 80 e 81 os resultados relativos à deflexão dos modelos com insertos de alumina sobremoldados por PSU e PEEK respetivamente, com 3 mm de espessura.

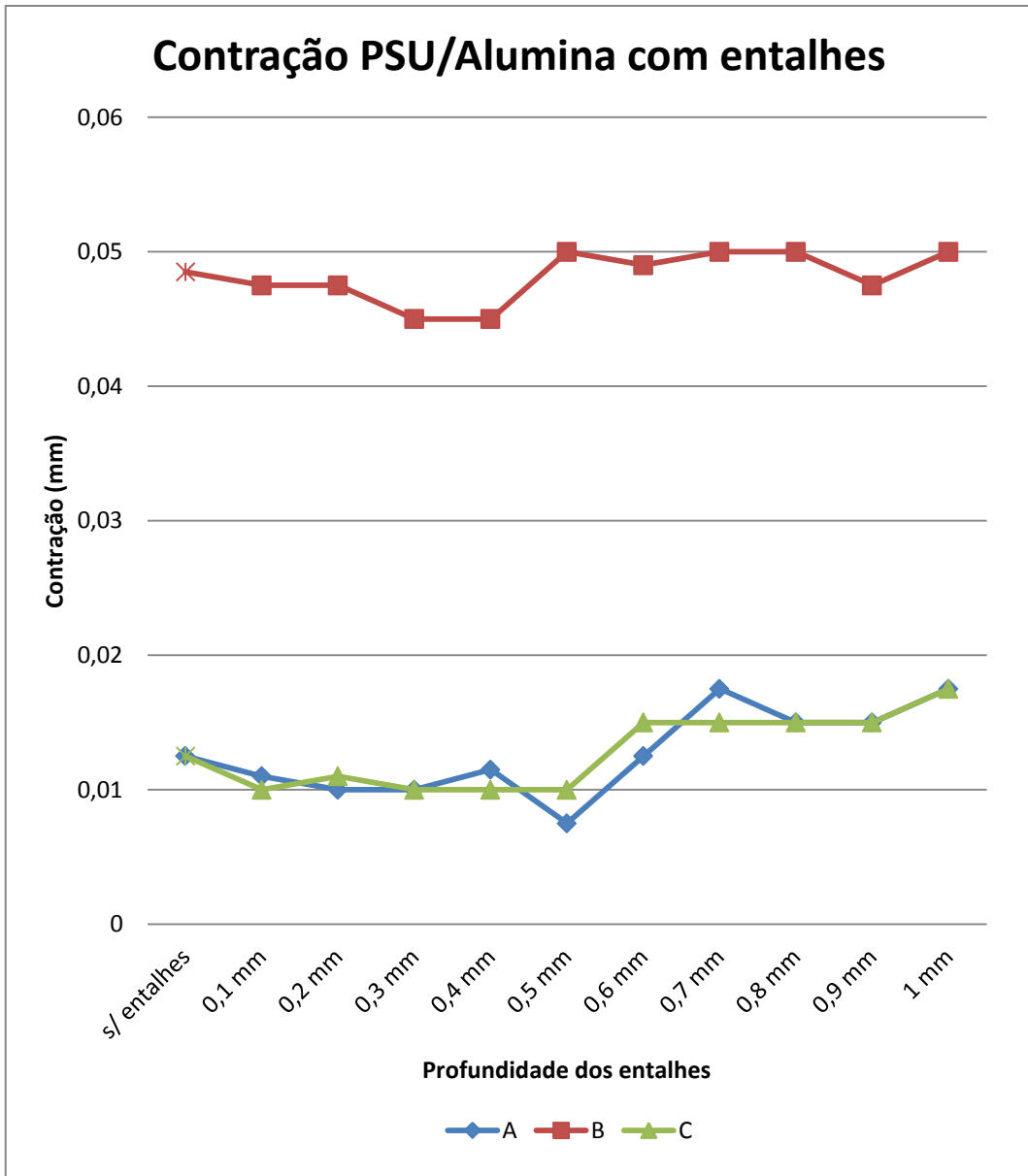


Figura 80 - Contração do modelo PSU/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm e sem entalhes.

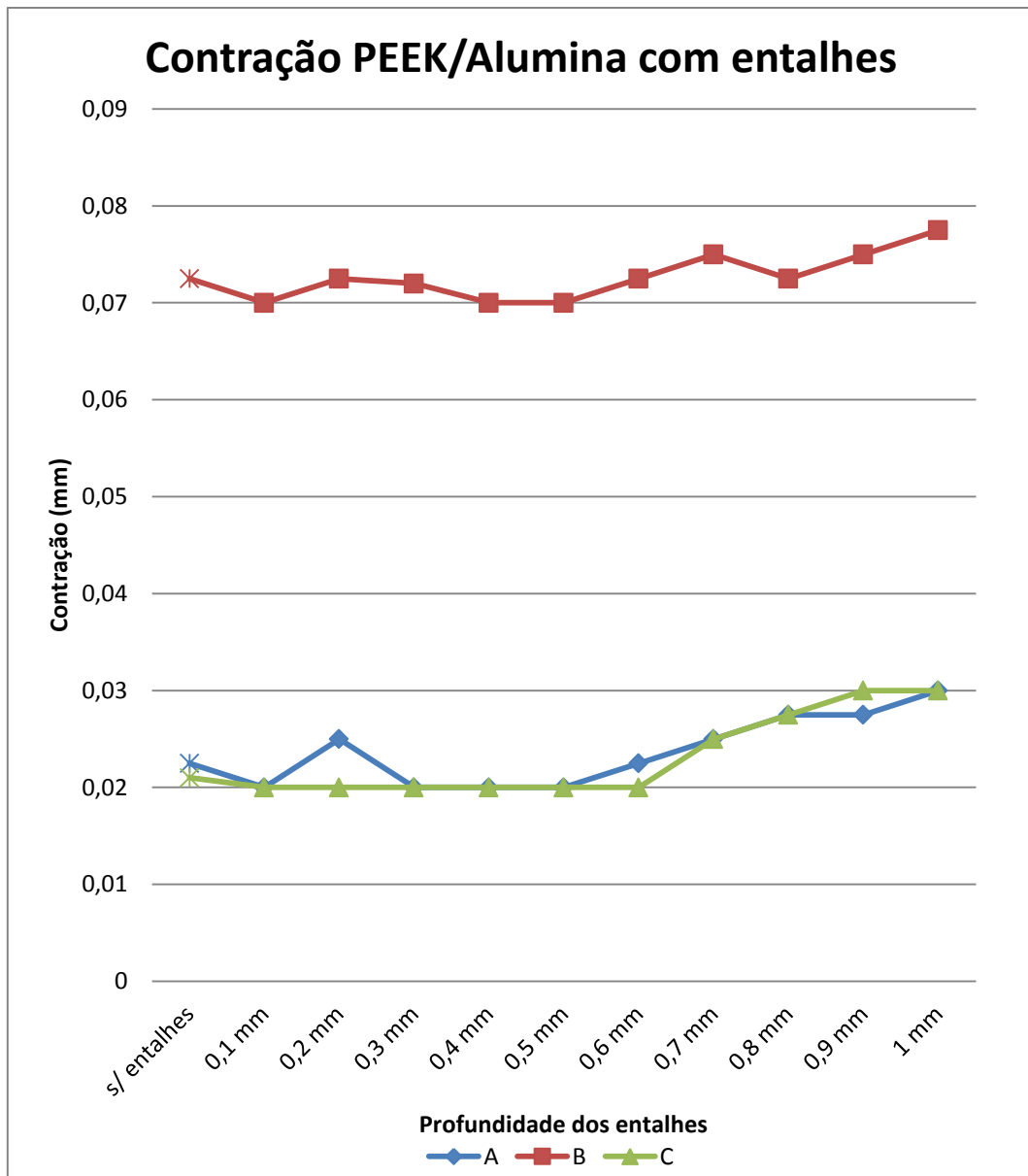


Figura 81 - Contração do modelo PEEK/Alumina com entalhes de profundidade 0,1 a 1 mm e sem entalhes.

As figuras 80 e 81 permitem verificar que a introdução de entalhes nos insertos cerâmicos permite reduções do ponto de vista das contrações presentes nos modelos. No entanto, estas conclusões não podem ser aplicadas para a generalidade das profundidades consideradas no estudo. Analisando atentamente a figura 80 relativa ao modelo PSU/Alumina, é perceptível que os entalhes com profundidades compreendidas entre 0,1 e 0,4 mm são benéficos do ponto de vista da redução das contrações. Por outro lado, é também possível apontar a profundidade de 0,3 mm como a mais

vantajosa. As profundidades de 0,5 a 1 mm não proporcionam diminuição de contrações.

Já no que diz respeito ao modelo PEEK/Alumina (figura 81), de 0,1 a 0,6 mm de profundidade, os entalhes revelam melhorias relativamente à não existência dos mesmos. As profundidades 0,1; 0,4 e 0,5 demonstram ser as mais influentes tendo como função a redução da contração do modelo.

A interface Alumina/PSU revela ser a mais indicada para a produção final dos modelos, visto permitir a obtenção de valores de contração inferiores às da interface Alumina/PEEK, bem como, menor diferença entre os mesmos ao longo do comprimento das moldações.

## Capítulo 5 - Conclusões

Neste estudo foram analisados alguns problemas no âmbito da moldação sobre insertos através do processo de simulação numérica, de forma a perceber a influência de algumas variáveis na qualidade final das peças. Os parâmetros de processamento, aquecimento de insertos e introdução de entalhes foram analisados permitindo compreender os fenómenos inerentes ao aparecimento de tensões residuais internas (induzidas pelo escoamento e térmicas), que em tanto contribuem para a qualidade e rigor dimensional do produto final.

Numa fase inicial foi aplicada a metodologia de Taguchi como meio de otimização dos parâmetros de processamento, e de perceção acerca da importância que os mesmos desempenham na redução da deflexão total dos modelos em estudo. Os dados referentes à aplicação do método de Taguchi permitiram posteriormente realizar simulações numéricas com recurso ao software Autodesk Moldflow Insight®.

Relativamente aos parâmetros de processamento considerados (Temperatura do fundido, tempo de enchimento, pressão de compactação e tempo de compactação), foi possível concluir que para espessuras de termoplástico menores, a pressão de compactação desempenha um papel fundamental na redução de empenos. No entanto, à medida que a espessura de termoplástico aumenta, a influência dos diversos fatores é menos discrepante. É importante reter que a temperatura do fundido e a pressão de compactação são os fatores mais determinantes na redução das deflexões e conseqüentemente das contrações ao longo do comprimento dos modelos.

No que diz respeito às deflexões, foi possível concluir que o valor das mesmas aumenta com o aumento da espessura, o que representa a confirmação da importância da espessura de termoplástico sobremoldado. A deflexão nos modelos com 1 mm de espessura de termoplástico é cerca de 10 vezes inferior à dos modelos com 5 mm de espessura. Algo que não deixa de ser espectacular uma vez que para

espessuras de termoplástico superiores, a acomodação e relaxação de tensões induzidas pelo escoamento é menos eficaz, permitindo maior variabilidade dimensional.

Durante o estudo foi também avaliada a influência do aquecimento de insertos, concluindo-se que não representa mais valia na redução de deflexões nos casos de estudo, visto que, com o aumento da temperatura dos insertos, os valores de deflexão globais aumentam para todos os casos estudados, bem como a área dos mesmos.

Tal como tinha sido sugerido pelo estudo levado a cabo pela N.C.A Technologies [4], a introdução de entalhes tem efeitos benéficos relativamente à deflexão total dos modelos, permitindo reduzi-los. No caso da interface PSU/Alumina, as profundidades de entalhes de 0,1 a 0,4 mm são as mais vantajosas. Já no caso da interface PEEK/Alumina as profundidades mais vantajosas são de 0,1 a 0,6 mm.

Analogamente ao que acontece com as deflexões, com o aumento da espessura do termoplástico aumentam também os valores de contração de um modo geral ao longo do comprimento dos modelos. A interface que permite a obtenção de valores mais baixos ao nível das contrações é também PSU/Alumina.

Também ao nível das contrações à semelhança do que acontecia nas deflexões, e como seria espectável, o aquecimento dos insertos não apresenta vantagens para temperaturas de 50, 100 e 150 °C. Apenas no caso do aquecimento dos insertos a 200 °C é possível verificar melhorias relativamente aos valores de contração. Devido à maior homogeneidade térmica e portanto melhor relaxação de tensões residuais térmicas.

Por fim, a introdução de entalhes nos insertos cerâmicos, revelou ser importante para reduzir as contrações dos modelos PSU/Alumina e PEEK/Alumina, no primeiro caso, com profundidades de entalhes compreendidas entre 0,1 e 0,4 mm, e para o segundo para profundidades de 0,1 a 0,6 mm, analogamente ao que acontecia no caso das deflexões.

De um modo geral, em relação aos tipos de termoplásticos, é notório que a polisulfona (PSU) de composição amorfa proporciona valores de deflexão e contração inferiores do que a polieteretercetona (PEEK), o que era espectável, visto que há uma maior repetição das unidades ao longo das cadeias moleculares no caso dos



termoplásticos semicristalinos, de tal forma que estas se podem acomodar muito melhor e de forma mais ordenada.

Já no que diz respeito aos materiais cerâmicos utilizados (Alumina A-960® e Zircónia Z-507®) é possível verificar que os insertos de Alumina proporcionam deflexões menos acentuadas em todas as interfaces, bem como valores de deflexão mais constantes ao longo do comprimento dos modelos. Tal, pode ser justificado pelo facto de a Zircónia ter uma condutividade térmica ( $k=2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) mais baixa do que a Alumina ( $k=25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), atuando assim como um isolador térmico.

No caso do estudo [12] apresentado anteriormente, a diferença entre os CET do polímero e do inserto era bastante elevada, originando elevados valores de deflexão, essencialmente, devido às tensões residuais induzidas pelo escoamento, agravadas pelo constrangimento mecânico causado pelo inserto.

Neste caso, visto que as diferenças entre CET são significativamente menores, julga-se que as tensões residuais existentes resultam essencialmente do arrefecimento não uniforme da peça, visto que de um lado tem um material mais condutor do que do outro. Daí, os resultados serem melhores com a alumina que tem um  $k$  mais próximo do P-20 (material da ferramenta moldante).

Com base nos resultados obtidos e atentando nos pressupostos da modelação, é possível definir a interface Alumina/PSU, com entalhes de 0,2 mm, sem aquecimento de insertos, como sendo a mais indicada para a produção da peça final.

Quanto à espessura ideal de termoplástico nada pode ser concluído, visto que não se possuem informações efetivas sobre a quantificação assertiva das tensões residuais, que poderiam, por exemplo, ter sido analisadas através do *software* Abaqus® CAE.

A experiência adquirida após a simulação através de *softwares* apropriados tem provado ser o melhor método para desenvolver novos produtos com um mínimo tempo de desenvolvimento e reformulações necessárias [22;23].

## 5.1. Trabalhos futuros

Como trabalho futuro sugere-se a determinação, à semelhança do que existe para materiais metálicos, por exemplo, das espessuras ideais de moldação sobre insertos de materiais cerâmicos. Deste modo, nomeadamente através do software Abaqus CAE® seria possível perceber quais as espessuras que melhor poderiam acomodar o relaxamento de tensões e desse modo criar regras de projeto que, de algum modo, permitissem evitar fadiga e até fratura dos modelos após a sua extração e ou durante o seu tempo de serviço, mediante determinadas solicitações mecânicas.

Essas regras poderiam, durante a fase de projeto da ferramenta moldante permitir a definição de sistemas de controlo de temperatura mais efetivos para a situação térmica inerente às diferentes combinações de interfaces e aplicações.

# Bibliografia

- [1] Gruenberger, T. M., A. Priese, C. Van Bellingen, E. Grivei, C. Ciallella, N. Probst, M. Horrocks, et al. “PRIS Management Committee 2008 5” (n.d.). [http://www.pris.org.sg/files/Plastic & Rubber Journal08.pdf](http://www.pris.org.sg/files/Plastic%20&%20Rubber%20Journal08.pdf).
- [2] R. Stewart, “Automotive Plastics”, Plastics Engineering, 2003.
- [3] Hansen, M. “Overmolding: A Multifaceted Medical Device Technology.” Medical Device & Diagnostic Industry,(Jan. 2006).  
<http://www.mack.com/resource/Overmolding.pdf>.
- [4] Guillotin, F., and A. Ruffaldi. “Ceramic-Overmoulding Method and Composite Element Obtained by This Method”, December 2008.
- [5] Cunha, A. Moldação por Injecção e Materiais Plásticos. *Manual Do Projectista para Moldes de Injecção de Plástico*. Centimfe, 2003.
- [6] Krishna Venkataswamy, Rajesh Varma, Walter Ripple (s.d.). *Business Library*. Consultado em 8 de 3 de 2012, de [http://findarticles.com/p/articles/mi\\_hb6620/is\\_3\\_227/ai\\_n28968530/?tag=content;coll](http://findarticles.com/p/articles/mi_hb6620/is_3_227/ai_n28968530/?tag=content;coll)
- [7] Pötsch, G., and W. Michaeli. Injection Molding: An Introduction. Hanser Gardner Pubns,.
- [8] University of Maryland. (s.d.). Consultado em 3 de 4 de 2012, de <http://terpconnect.umd.edu/~skgupta/M3T/MMMP.html>
- [9] Moldflow Corporation, 2012- <http://wikihelp.autodesk.com>
- [10] Goodship, V. *Practical Guide to Injection Moulding*. Publishamerica Inc, 2004.
- [11] Capela, Fernando. 2011. Optimização de Sistemas Bi-material Obtidos por Moldação por Injecção. Mestrado. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

- [12] T. V. Zhil'tsova, et al., (2008). Numerical Simulation Of a PBT Component with Molded-in Metal Insert . *3rd International Conference on Polymers Moulds Innovations 2008*. University College Ghent, Belgium.
- [13] Rosato, D. V, D. V Rosato, and M. G Rosato. *Injection Molding Handbook*. Springer, 2000.
- [14] Becker, P. D. (s.d.). Universidade do estado de Santa Catarina. Obtido em 2012 de 4 de 20, de Introdução aos materiais poliméricos:  
[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/aula\\_10\\_polimeros.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/aula_10_polimeros.pdf)
- [15] Ensinger. (s.d.). *Ensinger*. Consultado em 20 de 6 de 2012, de <http://www.ensinger.dk/dk/produkter>
- [16] Strong, A. Brent. *Plastics: Materials and Processing*. 3rd ed. Prentice Hall, 2005.
- [17] Strong, A. Brent. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. Sme, 2008.
- [18] Queirós, Luís. 2005. Projecto de Moldes Híbridos com Auxílio de Técnicas Assistidas por Computador. Mestrado. Universidade do Minho, Escola de Engenharia.
- [19] Pelley, B. (s.d.). *Product Development and Management Association*. Consultado em 12 de 4 de 2012, de pdma: [www.pdma.org/view\\_document.cfm?pk\\_document=250](http://www.pdma.org/view_document.cfm?pk_document=250)
- [20] Tang, S. H., Y. J. Tan, S. M. Sapuan, S. Sulaiman, N. Ismail, and R. Samin. “The Use of Taguchi Method in the Design of Plastic Injection Mould for Reducing Warpage.” *Journal of Materials Processing Technology* 182, no. 1 (2007): 418–426.
- [21] Ghazali, M. F., Z. Shayfull, N. A. Shuaib, S. M. Nasir, and M. M Salleh. “Injection Mould Analysis in Reducing Warpageof Nylon PA66 Side ArmsUsing Taguchi Method and ANOVA” (n.d.). <http://www.ijens.org/Vol%2011%20I%2001/117501-6363%20IJBAS-IJENS.pdf>.
- [22] Kamal, M. R. *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Hanser Verlag, 2009.

[23] Nee, A. Y.C, and S. K. Ong. *Computer Applications in Near Net-shape Operations*. Springer Verlag, 1999.

[24] GE Plastics, Design Guide.



# Anexos

Tabela 16 – Lista de nós analisados nas simulações de deflexão mínimas com e sem aquecimento de insertos para as diferentes espessuras de termoplástico considerado.

		A	B	C
Espessura de termoplástico	1mm	12	558	10
		11	664	91141
		551	25825	545
		554	21115	548
	2mm	9	1189	11
		10	1122	38308
		809	25154	965
		932	19772	1088
	3mm	7	938	5
		8	862	51435
		768	15389	582
		675	22265	489
	4mm	11	1198	9
		12	1134	38014
		1016	17767	854
		935	22609	773
	5mm	11	1198	9
		12	1134	32617
		1061	17284	893
		929	21532	809

Tabela 17 - Lista de nós analisados para as simulações de deflexão nos modelos com entalhes.

		A	B	C			A	B	C
Profundidade dos entalhes	0,1 mm	17	839	22	0,6 mm	118	2270	115	
		18	727	137447		117	1984	195290	
		592	13118	965		2197	91283	1911	
		451	27043	1106		2483	110214	1752	
	0,2 mm	86	3642	83	0,7 mm	118	6392	115	
		85	3350	180555		117	6106	184004	
		3497	82040	3205		6319	86221	6033	
		3699	102475	2953		6605	105152	5874	
	0,3 mm	86	3630	83	0,8 mm	118	6392	115	
		85	3338	178472		117	6100	188568	
		3485	80719	3193		6313	86124	6027	
		3687	100663	2941		6599	104956	5868	
	0,4 mm	86	3630	83	0,9 mm	118	6338	115	
		85	3338	183269		117	6052	195874	
		3485	84439	3193		6265	89398	5979	
		3687	104383	2941		6551	108230	5820	
	0,5 mm	17	940	22	1 mm	118	6335	115	
		18	810	199721		117	6055	206352	
		570	21008	997		6196	93237	5916	
		411	40645	1156		6389	112238	5673	



**Tabela 18 - Lista de nós analisados para as simulações de contração nos modelos sem entalhes as diferentes espessuras de termoplástico considerado.**

		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Profundidades de termoplástico</b>	<b>1 mm</b>	12	558	10
		15667	15844	15671
		15655	15861	15662
		11	625	91141
		1156	25825	545
		15954	15961	16024
		16580	16560	16819
		1291	20865	548
	<b>2 mm</b>	9	1189	11
		14924	15104	14920
		14936	15003	14929
		10	1122	38308
		854	24606	1010
		15186	15196	15253
		16002	15717	15739
		887	19944	1043
	<b>3 mm</b>	7	938	5
		1	14	2
		4	171	3
		8	862	51435
768		15389	582	
408		7853	327	
246		1773	89	
675		22265	489	
<b>4 mm</b>	11	1198	9	
	13385	13470	13392	
	13397	13607	13402	
	12	1134	38014	
	1016	17767	854	
	14150	14147	14270	
	13707	13732	13724	
	935	22609	773	
<b>5 mm</b>	11	1198	9	
	12653	12825	12663	
	12667	12823	12672	
	1061	17284	893	
	13419	13555	13517	
	12848	12872	13068	
	929	21681	761	

Tabela 19 – Lista de nós analisados para as simulações de contração nos modelos com entalhes.

		A	B	C			A	B	C
Profundidade dos entalhes	0,1 mm	17	839	22	0,6 mm	118	2270	115	
		14	2200	61		88034	77444	83481	
		13	2276	62		88015	77290	83499	
		18	727	137447		117	1984	195290	
		592	13118	965		2197	91283	1911	
		199	1829	2562		88089	77060	83557	
		316	1443	2445		88164	76752	83648	
		451	27043	1106		2483	110214	1752	
	0,2 mm	86	3642	83	0,7 mm	118	6392	115	
		79166	67916	73104		82976	72427	77999	
		79143	67823	73122		82952	72273	78090	
		85	3350	180555		117	6106	184004	
		3497	82040	3205		6319	86221	6033	
		79218	67647	73179		83029	72041	78067	
		79314	67377	73273		83115	71732	78158	
		3789	102475	3043		6605	105152	5874	
	0,3 mm	86	3630	83	0,8 mm	118	6386	115	
		77420	66410	71598		82980	73129	78084	
		77401	66495	71615		82955	73093	78104	
		85	3338	178472		117	6100	188568	
		3485	80719	3193		6313	86124	6027	
		77477	66232	71662		83033	72169	78154	
		77560	65971	71764		83117	71910	78242	
		3687	100663	2941		6599	104956	5868	
	0,4 mm	86	3630	83	0,9 mm	115	6338	115	
		81143	70246	75434		78084	76546	81633	
		81122	70144	75451		78104	76509	81653	
		85	3338	183269		188568	6052	195874	
		3485	84439	3193		6027	89398	5979	
		81199	69935	75503		78154	76400	81703	
		81285	69621	75596		78242	76076	81791	
		3687	104383	2941		5868	108230	5820	
0,5 mm	17	940	22	1 mm	118	6335	115		
	14	2593	63		90155	81090	86295		
	13	2680	64		90132	81017	86311		
	18	810	199721		117	6055	206352		
	570	21008	997		6196	93237	5916		
	210	2240	3011		90208	80813	86354		
	345	1628	2876		90294	80192	86448		
	411	40645	1156		6389	112238	5673		

