



**Universidade de
Aveiro**

Ano 2019

Departamento de Engenharia Mecânica

**Fábio Manuel
Pinho Silva**

**Previsão do comportamento de peças sobre-
moldadas por injeção aquando em serviço**



**Universidade de
Aveiro**
Ano 2019

Departamento de Engenharia Mecânica

**Fábio Manuel
Pinho Silva**

Previsão do comportamento de peças sobre- moldadas por injeção aquando em serviço

Dissertação 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 e da Doutora Tatiana Vladimirovna Zhiltsova, Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos UID/EMS/00481/2019-FCT – FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 – Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

Dedico este trabalho à minha família e amigos por todo o apoio demonstrado ao longo deste percurso, que me permitiu nunca desistir dos meus objetivos.

O júri

Presidente

Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Engenheira Andreia Cristina Gonçalves da Costa
Engenheira Especialista da Oliveira & Irmão, Lda.

Orientadora

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

Agradecimentos

Este ponto é dedicado a todos aqueles que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para que fosse possível realizar esta dissertação com sucesso.

O meu agradecimento à Professora Doutora Mónica Oliveira pela orientação, disponibilidade demonstrada e conhecimento transmitido que foram fundamentais no desenvolvimento desta dissertação.

O meu agradecimento à Doutora Tatiana Zhiltsova pela disponibilidade e ajuda no domínio do software AMI®, bem como na aquisição de conhecimento relativo ao processo de moldação por injeção.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmã, que sempre me incentivaram e ajudaram nos momentos mais difíceis deste percurso.

A ti Sabrina, que nestes anos tens sido o meu pilar, o meu maior apoio, a minha companheira de vida. O teu amor incondicional e cumplicidade foram determinantes para completar esta etapa.

Aos meus amigos, em especial ao Fábio Silva, Mário Rui e Diana Tomé, por todos os momentos de convívio e pelo companheirismo durante este percurso.

Palavras-chave Moldação por injeção, sobre-moldação, insertos metálicos, empenos, contrações, tensões residuais, Simulação Numérica, AMI®, otimização, DOE, ANSYS.

Sumário

A indústria de moldes é uma das mais prolíferas no mundo, estando em constante evolução tecnológica na busca de novos produtos. A sobre-moldação, como variante do processo de moldação por injeção, tende a acompanhar esta evolução.

A sobre-moldação por insertos é uma técnica que surgiu da evolução tecnológica, a qual é capaz de aliar a performance de dois materiais com origens diferentes para a obtenção de um produto de grande qualidade. Esta técnica exige um grande conhecimento específico, considerando todas as particularidades de processamento e *design*, nomeadamente no que à interface entre materiais diz respeito.

Neste trabalho foi analisada uma peça constituída por um subcomponente termoplástico e um subcomponente de metal com o objetivo de prever o seu comportamento aquando do seu processamento e em serviço. A metodologia baseou-se em simulações reológicas (*Autodesk Moldflow Insight*) e estruturais (*ANSYS*) direcionadas para a análise e otimização de parâmetros de qualidade, nomeadamente contrações, empenos, tensões residuais e de que forma estes influenciam o cumprimento de cotas críticas da peça, o *design* e os requisitos funcionais da mesma.

A metodologia inclui a utilização de uma ferramenta de otimização, um módulo de *Design of Experiments* (DOE), com o propósito de melhorar as condições sobre as quais a peça é processada.

Os resultados obtidos permitiram perceber que o DOE revela-se uma ferramenta útil na otimização das condições de processamento. Ao proceder-se a análises estruturais da peça aquando em serviço foi possível perceber que, embora ainda haja algum caminho a percorrer nesse sentido, a inclusão do histórico de processamento da peça numa simulação estrutural que visa a previsão do seu comportamento aquando em serviço, é um fator determinante para uma correta simulação de peças sobre-moldadas com insertos.

Keywords

Injection Molding, overmolding, metal inserts, processing conditions, deflection, warpage, shrinkage, residual stresses, numeric simulation, AMI[®], optimization, DOE, ANSYS

Abstract

The injection molding industry is one of the most prolific in the world, being in constant technological evolution in the search of new products. The overmolding, as a variant of the injection molding process, tends to follow this evolution.

Insert molding is a technique that emerged from the technological evolution, being able to combine the performance of two materials with different backgrounds to obtain a product of great quality. This technique requires an extensive specific knowledge, to account for all the particularities of processing and *design*, arising from the existence of an interface between different materials.

In this investigation, a part consisted of thermoplastic and metal subcomponents was analysed in order to predict its behaviour during processing and in service. The methodology was based on rheological (*Autodesk Moldflow Insight*) and structural (ANSYS) simulations focusing on the analysis and optimization of the quality parameters, namely warpage, shrinkage, residual stresses and its influence on their compliance with the critical project drawing dimensions, *design* and functional requirements.

The methodology includes an optimization tool, DOE, applied towards ascertainment of the process conditions.

The analysis of the DOE results allowed to get an insight into usefulness of this optimization technique. When carrying out the structural analyses of the part in service, although there's still a long way to go, it was possible to see that by including part processing data in a structural simulation that aims to predict its behaviour in service, it is a determinant factor for a correct simulation of overmolded parts with inserts.

Índice

Lista de siglas/abreviaturas	v
Lista de Símbolos	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas	x
1. Enquadramento da Dissertação	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Guia de Leitura.....	3
2. Revisão de Literatura.....	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Técnicas Avançadas de Processamento	5
2.3 Sobre-Moldação.....	8
2.3.1 Moldação por Insertos	8
2.4 Design para a moldabilidade de peças sobre-moldadas	11
2.5 Peças sobre-moldadas: problemas com processamento e em serviço.....	15
1.6 Simulação numérica na sobre-moldação.....	18
1.6.1 Ferramentas de simulação numérica	19
1.6.2 Metodologia de simulação numérica adotada.....	24
3. Metodologia de Análise.....	26
3.1 Caso de Estudo – Desenvolvimento do Modelo.....	26
3.1.1 Aplicação das regras de design para insertos metálicos	28
3.1.2 Desenho Técnico e Montagem da Peça	29
3.1.3 Materiais Utilizados	30
3.1.4 Expansão Térmica dos Materiais.....	33
3.1.5 Comportamento mecânico dos polímeros.....	35

3.2	Modelo de Simulação Numérica.....	37
3.2.1	Estudo de convergência do modelo	39
3.2.2	Máquina de Injeção	42
3.2.3	Modelação dos Sistemas funcionais do molde	43
3.3	Estudo Numérico	44
3.3.1	Estudo de Referência.....	47
3.4	DOE: otimização do processo de moldação	50
3.4.1	DOE presente no AMI®	51
3.5	Pré-aquecimento dos insertos.....	52
3.6	Análise estrutural: importação do histórico de processamento	52
3.6.1	Simulações comparativas	56
4.	Resultados e Discussão.....	59
4.1	DOE aplicado ao caso de estudo.....	59
4.1.1	Experiência da influência das variáveis	60
4.1.2	DOE da resposta das variáveis.....	61
4.2	Deflexões e Empenos.....	63
4.3	Variações Dimensionais	65
4.3.1	Variações Dimensionais com pré-aquecimento dos insertos	68
4.4	Contrações	70
4.5	Linhas de Soldadura	72
4.6	Tensões Residuais	76
4.6.1	Tensões Residuais: Importação do Histórico de Processamento.....	77
4.6.2	Comportamento da peça em serviço	80
4.6.3	Pré-aquecimento do inserto.....	84
5.	Conclusões do estudo.....	88
5.1	Recomendações para trabalhos futuros.....	91

Referências Bibliográficas.....	93
Anexos	96

Lista de siglas/abreviaturas

<i>Sigla</i>	<i>Nomenclatura</i>
AMI	Autodesk Moldflow Insight
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
DOE	Design of Experiments
EUA	Estados Unidos da América
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
POM	Polióxido de Metileno
TPEs	Thermoplastic Elastomers

Lista de Símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Unidade</i>
α	Coeficiente de Expansão Térmica	1/°C
ρ	Densidade	g/cm ³
D	Diâmetro	mm
D_e	Diâmetro externo	mm
D_i	Diâmetro interno	mm
e	Espessura	mm
c_p	Calor específico	J/kg °C
k	Condutividade Térmica	W/m °C
E	Módulo de Elasticidade	MPa
ν	Coeficiente de <i>Poisson</i>	-
G	Módulo de Corte	MPa
σ_y	Tensão de Cedência	MPa
θ	Ângulo de junção frentes enchimento	° (graus)

Índice de Figuras

Figura 1 - Técnicas Avançadas de Processamento (adaptado de [1])	5
Figura 2 - Peça com disposição carcaça/núcleo (adaptado de [4])	6
Figura 3 - Processo de Sobre-Moldação (Adaptado de [6])	8
Figura 4 - Esquema do processo de moldação por insertos (adaptado de [7])	9
Figura 5 - Colocação do inserto no molde (adaptado de [7]).....	10
Figura 6 - Técnicas de ligação mecânica por bloqueio (adaptado de [9]).....	12
Figura 7 - Exemplos de design para sobre-moldação (adaptado de [9])	13
Figura 8 - Design para a moldabilidade de insertos metálicos (adaptado de [11])	14
Figura 9 - Técnicas de Design de Insertos (adaptado de [12])	15
Figura 10 - Erros mais comuns nas malhas [18]	23
Figura 11 - Esquema da Metodologia simulação numérica	25
Figura 12 - Modelo CAD do Inserto Metálico	26
Figura 13 - Modelo CAD da parte plástica	27
Figura 14 - Peça fraturada (adaptado de [2])	27
Figura 15 - Modelo CAD da Peça Sobre-Moldada	28
Figura 16 - Montagem da peça em serviço (cortesia OLI – Sistemas Sanitários S.A).....	29
Figura 17 - Fenómeno da Expansão Térmica Superficial.....	33
Figura 18 - Comportamentos mecânicos típicos dos polímeros (adaptado de [24])... 35	
Figura 19 - Representação Esquemática do Modelo com a malha tridimensional.....	38
Figura 20 - Representação Esquemática da malha 3D do inserto.....	38
Figura 21 - Representação Esquemática da malha 3D da parte plástica	39
Figura 22 - Tetraedro de 4 nós (adaptado de [28])	40
Figura 23 - Modelo de Simulação Numérica e respetivo Sistema de Injeção	43
Figura 24 - Representação esquemática do sistema de alimentação.....	44
Figura 25 - Representação das Linhas de Soldadura	45
Figura 26 - Identificação dos Nós Seleccionados	45
Figura 27 - Identificação das Camadas	46
Figura 28 - Dimensões das Camadas em Estudo	47
Figura 29 - Gráfico da Pressão no ponto de Injeção	49

Figura 30 - Distribuição da Temperatura na Peça para o tempo de 17,92s.....	50
Figura 31 - Malha em ANSYS	54
Figura 32 - Deslocamento aplicado na simulação estrutural	54
Figura 33 - Pressão aplicada na simulação estrutural	56
Figura 34 - Esquema da Metodologia aplicada	58
Figura 35 - Deflexões da Simulação Referência (corte transversal Y-Z).....	64
Figura 36 - Deflexões na Simulação Otimizada (corte transversal Y-Z).....	64
Figura 37 - Gráfico das variações dimensionais da Camada 1	66
Figura 38 - Gráfico das variações dimensionais da Camada 2	66
Figura 39 - Gráfico das variações dimensionais da Camada 3	67
Figura 40 - Gráfico da dimensão da camada 1 depois da deformação	69
Figura 41 - Gráfico da dimensão da camada 2 depois da deformação	69
Figura 42 - Gráfico da dimensão da camada 3 depois da deformação	69
Figura 43 - Percentagem de Contrações nas várias simulações numéricas.....	71
Figura 44 - Linhas de Soldadura (adaptado de [28])	73
Figura 45 - Ângulos de junção das frentes de enchimento: simulação referência	74
Figura 46 - Temperatura de formação das linhas de soldadura	75
Figura 47 - Deformações sem histórico de processamento.....	76
Figura 48 - Tensões sem histórico de processamento	77
Figura 49 - Deformações na Simulação Otimizada no ANSYS.....	78
Figura 50 - Tensões da Simulação Otimizada no ANSYS	79
Figura 51 - Deformações da Simulação otimizada em ANSYS.....	81
Figura 52 - Tensões na Simulação Otimizada em ANSYS (peça)	82
Figura 53 - Tensões na Simulação Otimizada em ANSYS (subcomponente plástico)	83
Figura 54 - Deformações da Simulação DOE com pré-aquecimento do inserto.....	85
Figura 55 - Tensões na Simulação DOE com pré-aquecimento do inserto (peça)	86
Figura 56 - Tensões na Simulação DOE com pré-aquecimento do inserto (subcomponente plástico).....	86
Figura 57 - Desenho Técnico (cortesia OLI - Sistemas Sanitários S.A).....	97

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades do inserto de Latão 60-40 genérico e do molde de Aço P-20 genérico	30
Tabela 2 - Propriedades do POM “Hostaform C 27021 GV3/30”	32
Tabela 3 - Estudo de Independência da Malha Tridimensional	41
Tabela 4 - Especificações da Máquina de Injeção "Victor Vs100"	42
Tabela 5 - Condições de processamento de Referência	48
Tabela 6 - Intervalos das Condições de Processamento	60
Tabela 7 - Percentagem de Influência das Variáveis	61
Tabela 8 - Tabela da Resposta das Variáveis	62
Tabela 9 - Condições de processamento Otimizadas pelo DOE.....	63
Tabela 10 - Espessura Mínima da Camada de plástico (adaptado de [12])	96

1. Enquadramento da Dissertação

O processo de moldação por injeção foi alvo de grandes evoluções e avanços tecnológicos que foram surgindo pela necessidade de criação de peças com melhor qualidade e maior diversificação. No contexto industrial os polímeros são considerados materiais de topo, adequados à produção em larga escala, aliando a sua alta performance ao seu baixo custo. Com a evolução da indústria surgiu a necessidade de se associarem dois ou mais materiais na tentativa de satisfazer os requisitos de determinados produtos, criando-se assim os processos multimaterial. Não tardou até ser necessário a criação de tecnologias que permitissem a junção de materiais com diferentes origens, nomeadamente polímeros e metais, constituindo os sistemas híbridos. A moldação por sistemas híbridos é uma tecnologia utilizada no processamento de peças constituídas por materiais termoplásticos com incorporação de elementos metálicos no processo de injeção. A moldação por insertos é a tecnologia abordada com maior detalhe durante esta dissertação e é um claro exemplo de um sistema híbrido. A possibilidade de junção de diversos materiais poliméricos, metálicos e até cerâmicos, fez com que esta tecnologia pudesse tirar partido das propriedades de cada um dos materiais com a clara intenção de melhorar a funcionalidade das peças finais. Isto abriu um novo horizonte de aplicações tornando estes sistemas bastantes úteis em acoplamentos vários como engrenagens, bobines, tampas de misturadores e até em componentes para a medicina como bisturis ou seringas [1].

No entanto, durante o processo de injeção de termoplásticos são originadas tensões nas peças moldadas que podem surgir devido ao próprio escoamento do polímero fundido, das altas pressões impostas durante o arrefecimento e solidificação do plástico, tendo estas responsabilidade e influência na deformação e, conseqüentemente, nos empenos que surgem na peça moldada, tornando-a menos resistente mecanicamente após a sua extração. Na moldação por insertos metálicos a magnitude das tensões residuais tende a agravar-se pelo facto de a interface polímero/metal resultante do processo de moldação induzir um arrefecimento não uniforme da peça e criar estrangimentos e restrições à contração dos polímeros.

Face ao exposto, a motivação para a elaboração desta dissertação de mestrado prende-se com a necessidade de definir estratégias mais assertivas de análise e otimização numérica do processo de moldação por insertos com o intuito de minimizar os possíveis defeitos resultantes do processo de fabrico, provocados pelas tensões residuais geradas nos componentes sobre-moldados.

1.1 Objetivos

A presente dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia capaz de analisar o comportamento de peças sobre-moldadas durante o seu processamento e em serviço. A metodologia implica o estabelecimento de processos para uma correta simulação numérica da peça recorrendo à análise e otimização do processamento da mesma durante a moldação por injeção, dando-se particular importância à qualidade do produto, no sentido de cumprir cotas críticas, isto é, minimização de variações dimensionais, por análise de contração e empeno. Este procedimento é efetuado com base no *software Autodesk Moldflow Insight 2016®* (AMI).

Por se tratar de uma tecnologia com particular suscetibilidade às condições de processamento, bem como à assertividade do design dos componentes do sub-conjunto, o histórico de processamento assume uma importância extrema na funcionalidade/durabilidade do produto aquando em serviço. Deste modo, importa-se o histórico de processamento para códigos de modelação numérica estrutural, onde se avaliam quer a magnitude das tensões residuais acumuladas na peça, bem como as consequências que podem advir desse histórico quando as peças são sujeitas a cargas típicas de operação. Utiliza-se como *software* de simulação estrutural, para esse efeito, o *ANSYS 2019®* (ANSYS). Neste contexto, a ponte estabelecida entre o AMI® e o ANSYS é realizada através do *Helius PFA 2019®* (Helius). Por fim, sujeita-se o conjunto a uma carga típica de operação e procede-se a uma análise crítica dos resultados obtidos, estabelecendo metodologias e procedimentos de otimização no processamento de peças sobre-moldadas.

1.2 Guia de Leitura

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos principais nos quais se incluem o enquadramento do estudo, a revisão de literatura, a metodologia aplicada, os resultados e a discussão dos mesmos e por fim as conclusões.

O primeiro capítulo é uma introdução ao tema do trabalho e como este se enquadra no estudo em questão. São também abordados os objetivos preconizados para esta dissertação e as motivações subjacentes.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica na qual se fez um levantamento da informação já conhecida sobre processos de moldação multimaterial, mais concretamente sobre a moldação por insertos, que técnicas de design para a moldabilidade são adotadas para peças moldadas sobre insertos metálicos e quais os principais problemas que ocorrem nestas peças. É ainda levantada informação sobre as metodologias aplicadas em simulações numéricas que caracterizam a sobre-moldação por insertos metálicos.

No terceiro capítulo é explicada toda a metodologia aplicada neste estudo, incluindo o caso de estudo em questão, a descrição dos materiais constituintes do componente sobremoldado, dos sistemas funcionais do molde e da tipologia de simulações realizadas. É ainda delineada a metodologia da importação do histórico de processamento de um *software* de simulação reológica do processo de moldação por injeção para um *software* de simulação estrutural.

No capítulo quatro são apresentados todos os resultados das simulações realizadas em termos de contrações, deflexões, variações dimensionais e tensões e a respetiva discussão.

Por fim, no quinto capítulo são retiradas algumas conclusões sobre a importância do estudo pormenorizado do processo de moldação por insertos metálicos e da importação do histórico desse mesmo processamento aquando duma correta simulação estrutural da peça em serviço. São ainda apresentadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

2. Revisão de Literatura

2.1 Introdução

Em 1872 foi criada e patenteada a primeira máquina de moldação por injeção, por parte dos irmãos Hyatt. Desde esse momento, a indústria de moldes tem-se desenvolvido a uma enorme escala constituindo, atualmente, uma das maiores indústrias a nível mundial. A globalização do mercado, tornou-se um grande fator de evolução, sendo que o aumento da competitividade, principalmente entre o mercado europeu, a China, a Índia e os EUA, levou a que se aprimorasse cada vez mais o processo e que, em muitos casos, se desenvolvessem novas técnicas de moldação por injeção. Essas técnicas levaram à obtenção de peças com melhor qualidade e maior complexidade, proporcionando avanços tecnológicos e, conseqüentemente, o desenvolvimento da indústria da moldação por injeção [1].

A moldação por injeção é um dos processos que mais se adequam à produção, em larga escala, de componentes plásticos, sendo que a facilidade de serem produzidos, as suas propriedades e o preço mais reduzido, tornam-nos numa alternativa extremamente eficaz aos tradicionais metais [2]. Os materiais de base polimérica têm uma grande gama de aplicações nos diferentes mercados de grande consumo, nomeadamente a indústria das embalagens, construção civil, indústria automóvel e também na produção de componentes elétricos e eletrónicos. Aliada à grande aplicabilidade dos seus produtos finais, a tecnologia de moldação por injeção apresenta ainda, um conjunto de vantagens que a tornam ainda mais atrativa. Dentro dessas vantagens destacam-se as elevadas cadências de produção, a grande flexibilidade no que diz respeito à geometria e dimensões dos moldes (uma gama de produção que pode ir desde as micromoldações, com valores inferiores a 1mg, até à produção de peças com valores superiores a 100 kg, que exigem moldes de enormes dimensões) e ainda uma grande reproducibilidade e precisão dimensional. Para complementar as vantagens do processo de moldação por injeção, podem ser moldados os vários tipos de polímeros, nomeadamente, termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros e, a partir de

compostos que tenham uma base polimérica, é possível fabricar peças metálicas ou cerâmicas com base nesta tecnologia [3].

2.2 Técnicas Avançadas de Processamento

A evolução da moldação por injeção trouxe consigo bastantes variantes do processo básico, nas quais se destacam os processos multimaterial e de moldação assistida. As técnicas de processamento existentes podem ser vistas com maior detalhe no esquema da Figura 1.

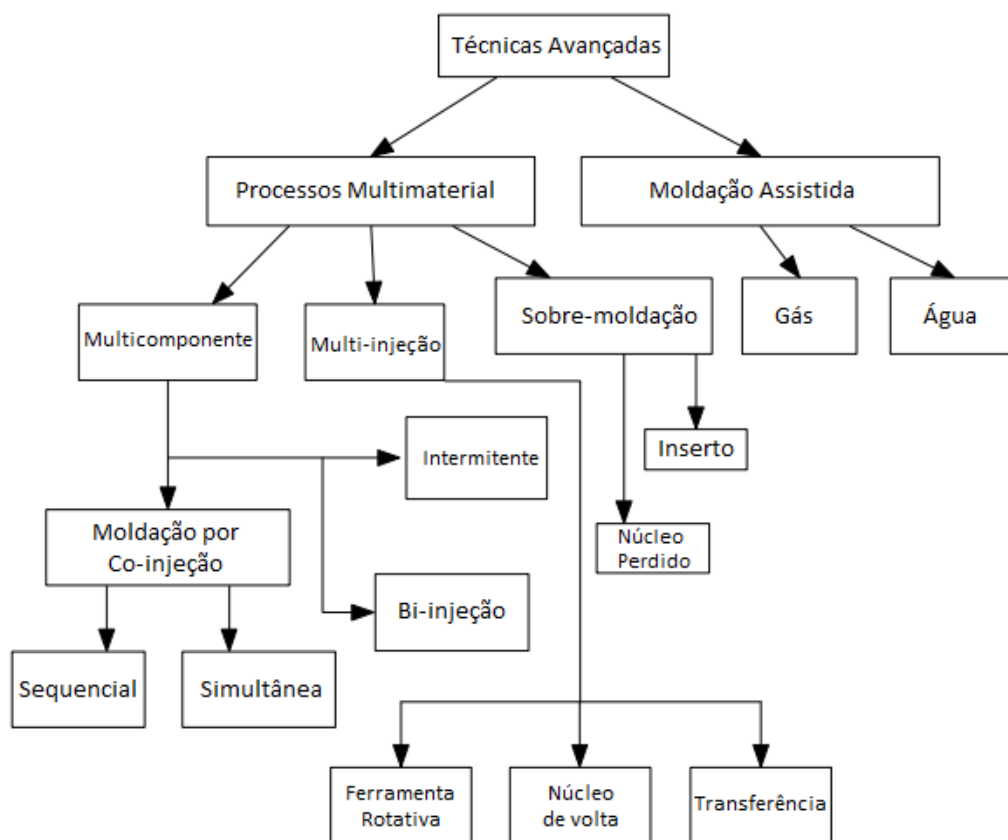


Figura 1 - Técnicas Avançadas de Processamento (adaptado de [1])

De uma forma sucinta, a moldação multimaterial consiste na adição de dois materiais com uma composição diferente, dentro do mesmo molde, formando assim objetos multimaterial que apresentam vantagens, tanto ao nível funcional como ao nível económico [4]. A moldação multimaterial pode não ser apenas com materiais de

diferentes composições, independentemente de serem compatíveis ou não, mas também com o mesmo material, variando apenas a cor. A escolha do processo de moldação multimaterial depende de fatores económicos, da produtividade, do tipo de produto que se pretende obter e do equipamento disponível. Dentro dos vários processos de moldação multimaterial, consideram-se: a transferência das moldações de uma máquina para a outra através de robots, a transferência das moldações da primeira posição de injeção para a segunda posição de injeção, dentro do mesmo molde e também por rotação incorporada no molde ou no prato da máquina que tem uma ou mais unidades de injeção [5].

A produção de peças multimaterial é cada vez mais uma realidade nas indústrias, sendo que os objetos obtidos pelas técnicas de moldação multimaterial apresentam melhores características que os objetos tradicionais, proporcionando ainda a diminuição do número de montagens e ligações entre objetos, diminuindo custos e aumentando a performance das peças finais. Segundo Gupta et al. [4], a moldação multimaterial apresenta as seguintes vantagens:

- Componentes multicolor: tornam as peças mais apelativas do ponto de vista estético, eliminando operações secundárias de pintura e acabamento;
- Componentes com uma disposição do tipo carcaça/núcleo: esta interação implica que o material do núcleo seja completamente coberto pelo material da carcaça, sendo que esta disposição pode ser usada como proteção do material do interior, para efeitos visuais e estéticos do objeto e também por uma questão económica, em que o material do interior possa ser mais barato e servir o mesmo propósito;

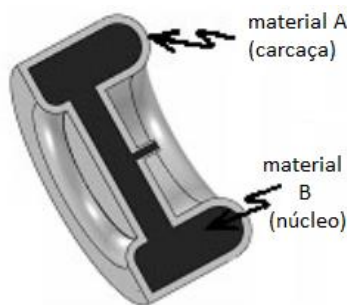


Figura 2 - Peça com disposição carcaça/núcleo (adaptado de [4])

- Componentes montados dentro do molde: elimina a necessidade de utilização de parafusos, fixadores, cola, solda e outras operações secundárias de montagem, eliminando custos inerentes a esta, produzindo objetos completamente montados e ligados;
- Componentes com compatibilidade: substituição de mecanismos como molas, eixos de rotação e outros, que necessitam de encaixes de duas ou mais partes, por peças com componentes compatíveis e que podem ser moldados de uma só vez;
- Componentes agradáveis ao toque: permite obtenção de objetos com a parte estrutural formada por um plástico rígido e as áreas de interação com o toque do ser humano serem formadas de um material mais suave ao toque (por exemplo escovas de dentes e as pegas de algumas máquinas);
- Benefícios económicos: redução das operações de montagem, redução da utilização de outras máquinas na produção, redução do número de componentes que se traduzem em poupança de tempo e consequentemente, de recursos económicos, tornando-se bastante atrativa para as empresas.

Como em todos os processos, apesar dos pontos positivos, na moldação multimaterial há a salientar algumas desvantagens, a destacar: um custo inicial muito significativo, devido ao investimento em equipamento e tecnologias de produção especializadas que, por sua vez, são mais caras que o equipamento tradicional (no entanto, a longo prazo, os lucros elevados são uma realidade); outra desvantagem prende-se com o facto de algumas das técnicas ainda não estarem suficientemente desenvolvidas do ponto de vista tecnológico, fazendo com que a escolha do processo a adotar recaia, muitas vezes, nos processos tradicionais; é necessário também especialistas em processos de moldação multimaterial, sendo que muitas dessas técnicas estão confinadas a um conjunto restrito de objetos e a sua reconfiguração para aplicar a diferentes linhas de produção torna-se um processo bastante complicado e dispendioso [4].

2.3 Sobre-Moldação

A sobre-moldação é uma das técnicas avançadas de moldação por injeção mais utilizadas na indústria e com mais aplicações. Goodship [1] define sobre-moldação como sendo a técnica em que um componente com uma determinada pré-forma é incorporado no molde e, posteriormente, encapsulado por outro material. Esta técnica não contempla apenas a sobre-moldação de plásticos sobre insertos metálicos, mas também de plásticos em cerâmicos. A Figura 3 representa um esquema simplificado do processo de sobre-moldação.

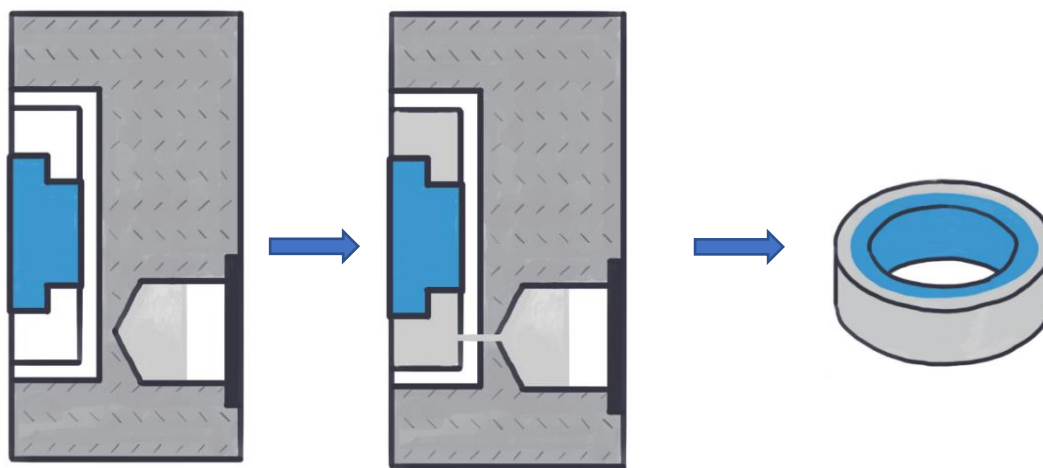


Figura 3 - Processo de Sobre-Moldação (Adaptado de [6])

Tal como se pode constatar na Figura 1, a sobre-moldação pode subdividir-se em duas técnicas distintas: a moldação por insertos (*Insert Molding*) e a moldação por núcleo perdido (*Lost-Core Molding*). Esta dissertação irá abordar com maior detalhe a moldação por insertos.

2.3.1 Moldação por Insertos

A moldação por insertos é uma variante da sobre-moldação que consiste na colocação de um inserto com uma forma pré-definida na cavidade moldante, antes da injeção do polímero. Quando se dá a injeção do polímero, o inserto é rodeado e envolvido pelo polímero, arrefecendo e resultando numa peça única fortemente

interligada. Este processo não se limita a uma composição de dois materiais podendo ser repetido até se atingir o número de camadas de material pretendidas [1]. O processo de moldação por insertos está ilustrado na Figura 4.

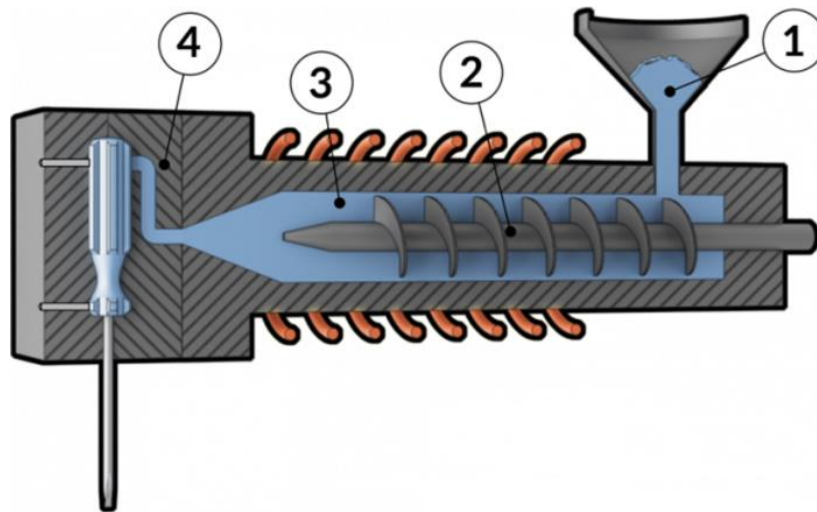


Figura 4 - Esquema do processo de moldação por insertos (adaptado de [7])

A diferença mais significativa, relativamente ao processo de moldação por injeção tradicional, consiste na montagem e incorporação do inserto, antes da injeção do polímero [7]. Como já referido anteriormente, a incorporação dos insertos no molde (Figura 5) pode ser levada a cabo, tanto pela intervenção humana como pela ação de robots, através da automação do processo. A precisão dimensional dos insertos e a sua incorporação cuidada dentro da ferramenta moldante são fatores que previnem a danificação do molde e promovem uma elevada coesão entre o material dos insertos e o material injetado.

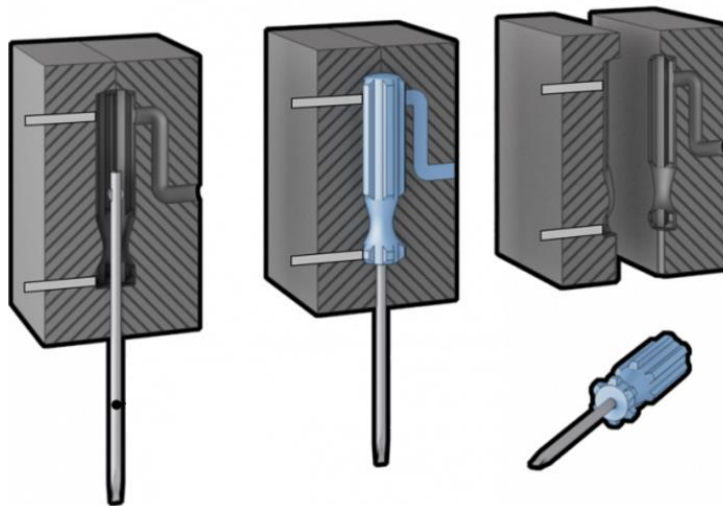


Figura 5 - Colocação do inserto no molde (adaptado de [7])

A moldação por insertos constitui uma alternativa concreta a muitos processos de montagem de componentes, tendo como principais vantagens [8]:

- dispensar o uso de parafusos, soldadura, adesivos e outros métodos de montagem, levando à diminuição dos custos de mão-de-obra;
- possibilitar a redução do peso e do tamanho das peças;
- aumentar a resistência ao choque e à vibração pelo melhor acoplamento entre materiais;
- aumentar resistência estrutural da peça, devido à coesão entre o polímero e o inserto;
- flexibilizar o design das peças, permitindo a obtenção de configurações e geometrias complexas, bem como de diversas combinações de materiais;
- consolidar e reduzir o número de componentes, com menores custos associados.

Todos os benefícios desta técnica, apresentados acima, levam a que a moldação por insertos tenha uma vasta gama de aplicações, entre as quais se destacam: equipamentos médicos como seringas e válvulas; componentes elétricos e equipamentos eletrônicos encapsulados, tais como carregadores de telemóvel; equipamento militar; buchas, tubos, pinos embutidos e ainda roscas de parafusos.

2.4 Design para a moldabilidade de peças sobre-moldadas

As regras gerais de design para a moldabilidade devem ser sempre tidas em conta na utilização de qualquer um dos processos de moldação por injeção, sendo que para além destas, existem algumas especificidades que devem estar aliadas às regras básicas. De acordo com a GLS Corporation [9] existe um conjunto de regras básicas de design para a moldabilidade direcionadas para a sobre-moldação de TPEs (elastómeros termoplásticos) com plásticos rígidos, das quais fazem parte:

- A espessura das paredes da camada do substrato e da camada sobre-moldante devem ser o mais uniforme possíveis (numa gama de 1,5mm – 3mm), com intuito de obter o melhor tempo de ciclo e garantir uma boa ligação dos materiais na maioria das aplicações de sobre-moldação;
- Evitar secções com grandes espessuras para minimizar problemas relacionados com a contração do material e para reduzir tanto o peso da peça como o tempo de ciclo;
- As diferenças de espessura devem ser graduais com o objetivo de reduzir problemas de escoamento do polímero (falhas de enchimento e bolhas de ar);
- Evitar uso de cantos pontiagudos, usando um raio mínimo de 0,5mm, tornando-os redondos, reduzindo assim as tensões localizadas;
- Evitar orifícios ou ranhuras demasiado profundas;
- Utilizar ângulos de saídas para facilitar a extração das peças;
- A espessura do material sobre-moldante deve ser menor ou igual à espessura da camada do substrato, prevenindo o empeno das peças finais (sobretudo em peças com geometrias planas e alongadas).

Outra das questões importantes no design para a moldabilidade de peças obtidas por sobre-moldação é a ligação dos materiais. A escolha dos materiais pode ser complicada, tendo em conta que estes se devem complementar um ao outro e serem compatíveis para que se criem peças eficazes do ponto de vista funcional. Para além da escolha do material existem duas formas para se conseguirem ligar as camadas, sendo elas a ligação

química na interface entre as camadas de materiais e ligações mecânicas que dependem do design e geometria das camadas.

Uma ligação perfeita e estruturada pode ser atingida combinando dois fatores: uma boa adesão molecular aplicando as técnicas de design acima referidas e através de ligações mecânicas por bloqueio. Os bloqueios mecânicos podem ser obtidos através da criação de orifícios que têm uma geometria mais alargada na base, geometrias que promovam a envolvimento do material moldante na camada inferior, bem como através de ranhuras ou saliências que aumentam a interface de contacto entre as duas camadas de material [9, 10]. Algumas dessas técnicas de bloqueio mecânico podem ser vistas na Figura 6.

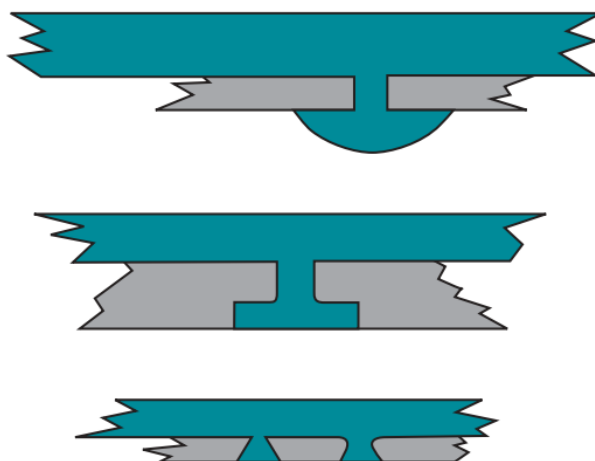


Figura 6 - Técnicas de ligação mecânica por bloqueio (adaptado de [9])

Na tentativa de contornar o problema do descasque e da delaminação do material da camada de polímero, podem-se aplicar algumas regras como alinhar as superfícies das secções das duas camadas de material e também a borda da camada de polímero não deve ser projetada de forma a se posicionar acima do contorno da camada do substrato, devendo estar sempre a um nível inferior [9, 10]. Ambos os casos referidos estão exemplificados na Figura 7.

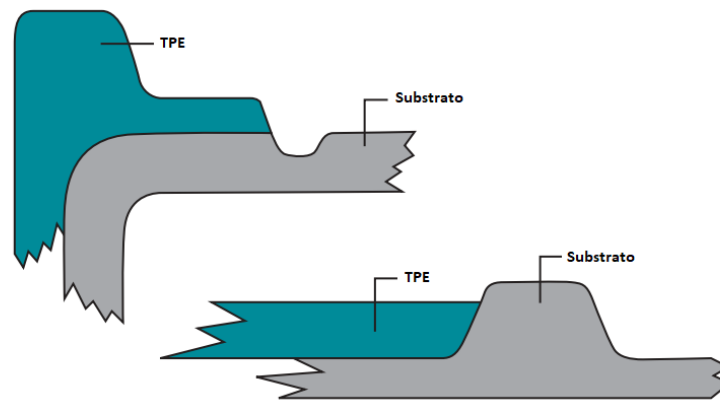


Figura 7 - Exemplos de design para sobre-moldação (adaptado de [9])

Relativamente à moldação por insertos, existem algumas regras de design para a moldabilidade específicas que devem ser aplicadas aquando da utilização deste processo. De acordo com Miller A. C. [11], as regras de design para a moldabilidade específicas de insertos metálicos com plásticos rígidos contemplam aspectos como:

- Formas arredondadas dos insertos ou estes possuírem saliências arredondadas e não pontiagudas, o que promove uma melhor adesão entre a camada de polímero e o inserto;
- utilização de elementos com entalhes que aumentam a retenção do inserto na camada de polímero;
- o inserto deve sobressair em relação à cavidade moldante (pelo menos 0,4mm);
- garantir que os insertos não são demasiadamente profundos na camada de polímero (a camada de polímero na parte inferior deve ter pelo menos $\frac{1}{6}$ do diâmetro do insertos) evitando rechupes na peça e enfraquecimento da linha de soldadura;
- o diâmetro externo da camada de polímero deve ser pelo menos 1,5 a 2 vezes o diâmetro do inserto metálico. Caso o diâmetro seja superior a 12,9 mm, a espessura da camada de polímero deve ser enquadrada de acordo com o material e a espessura geral da peça. O inserto deve ser sempre pequeno relativamente à camada de polímero envolvente;

- utilização de nervuras na linha de soldadura com o objetivo de aumentar o suporte da camada de polímero.

Para que melhor se entenda a aplicação destas regras, os aspectos acima mencionados estão ilustrados na Figura 8.

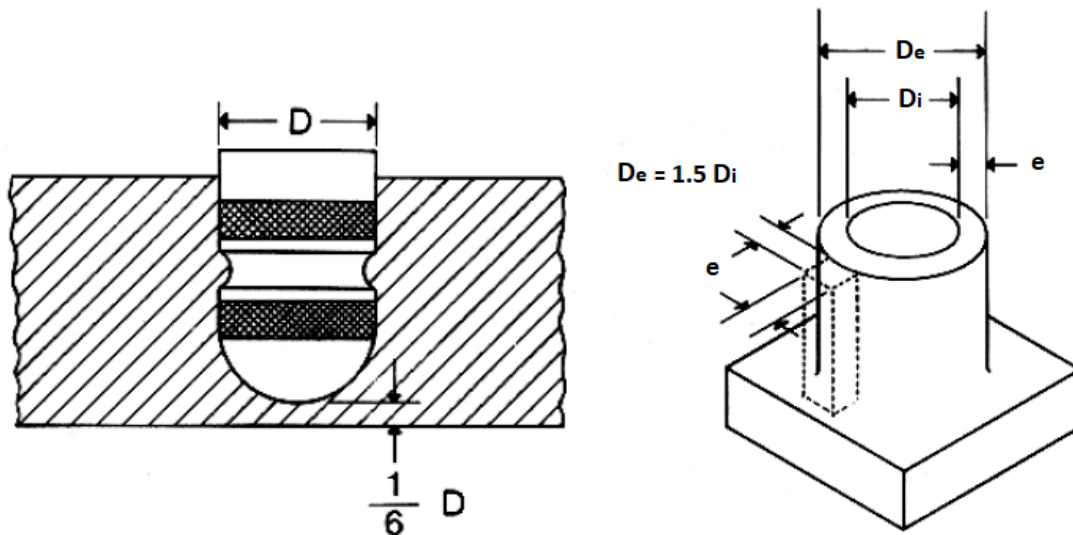


Figura 8 - Design para a moldabilidade de insertos metálicos (adaptado de [11])

Existem ainda algumas técnicas específicas que se podem aplicar ao design dos insertos metálicos. Quando aplicadas, estas promovem uma maior adesão dos insertos metálicos à camada de plástico, sendo que para facilitar o processo de moldação, os insertos devem ser posicionados perpendicularmente à linha de apartação do molde [12]. Algumas dessas técnicas de design dos insertos metálicos estão apresentadas na Figura 9.

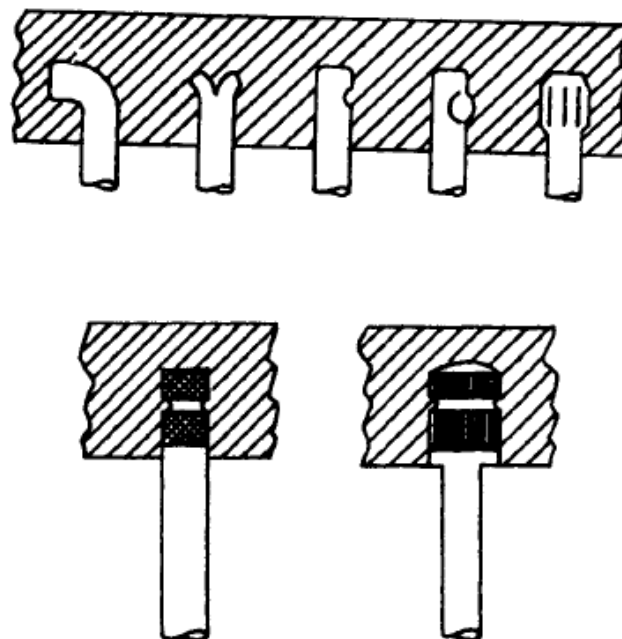


Figura 9 - Técnicas de Design de Insertos (adaptado de [12])

2.5 Peças sobre-moldadas: problemas com processamento e em serviço

Para além das potencialidades e vantagens inerentes, o processo de sobre-moldação apresenta alguns problemas associados. A GLS Corporation [9] considera que entre os problemas mais comuns na sobre-moldação de TPEs com plásticos rígidos pode-se encontrar:

- fraca adesão das camadas de material, causada pela incompatibilidade dos materiais, contaminação das superfícies e arrefecimento rápido do ataque;
- enchimento incompleto, tanto da camada do substrato bem como da camada de polímero que pode ter origem na falta de material, falta de pressão de injeção, arrefecimento rápido e velocidade de enchimento insuficiente;
- excesso de material na periferia da peça causada por deficiências no encaixe do molde, tonelagem inadequada da máquina de injeção, design inadequado de bloqueios mecânicos e contração da camada do substrato;
- linhas de soldadura de fraca qualidade causadas por bolhas de ar na frente de enchimento e temperatura do polímero baixa;

- rutura da camada de polímero que pode ser causada por suporte inadequado da camada do substrato, elevada pressão de injeção ou temperatura do polímero e má localização do ataque;
- empenos da peça causados por contração durante a injeção e distorção após a extração da peça;
- marcas na superfície que têm origem na contração do material e no arrefecimento rápido do ataque;
- cor não uniforme e brilho irregular nas peças devido a concentrações de cores incompatíveis e grande peso molecular do composto de materiais;
- difícil extração das peças devido a ângulos de saída insuficientes, temperatura elevada da cavidade e existência de vácuo nas peças;
- extremidades das peças queimadas e outras marcas de calor causadas por falta de fugas de ar e temperatura demasiado elevada do polímero;
- buracos ou pequenas cavidades causadas pelo vácuo devido a uma pressão de compactação insuficiente durante a solidificação do material.

Segundo Miller A. C. [11], existem desvantagens e problemas associados à moldação por insertos, nos quais se podem incluir:

- a possibilidade de deslocação dos insertos dentro do molde que podem causar estragos no próprio molde;
- a existência de vestígios e pequenos segmentos de plástico nos insertos que leva à necessidade de limpeza;
- dificuldade na incorporação dos insertos no molde prolongando o tempo de ciclo (deve-se garantir que o inserto fica localizado numa parte acessível do molde);
- fixação deficiente do inserto metálico no molde durante o processo de injeção;
- os insertos requerem um pré-aquecimento levando à sua expansão;
- recuperação difícil e dispendiosa de insertos presentes em peças rejeitadas;
- contração do polímero em redor do inserto causando tensões residuais que podem levar à rutura do plástico pós-moldação.

Com intuito de encontrar a origem dos problemas causados pela sobre-moldação e de propor soluções para colmatá-los, foram levados a cabo vários estudos sobre a moldação por insertos metálicos. Recorrendo a um método de simulação numérica, Liu et al. [13] analisaram a influência de vários parâmetros de processamento no empeno de uma peça, durante o processo de moldação por insertos. Constatou-se que aumentando o tempo e a pressão de compactação, o empeno reduz-se, mas apenas antes do ataque estar totalmente arrefecido. Mais se verificou que o aumento da temperatura do polímero e da temperatura do molde, traduzem-se num aumento do empeno, revelando-se desvantajoso para as peças obtidas.

Izadi et al. [14] identificaram uma das maiores carências das peças sobre-moldadas, analisando uma peça com um inserto metálico. Verificaram a existência de uma tendência da camada de polímero desenvolver algumas tensões residuais que poderiam ter duas possíveis causas: deformação viscoelástica do termoplástico durante a fase de enchimento e compactação e também o constrangimento causado pelo inserto metálico, que induz tensões residuais na camada de polímero. Isto pode ter consequência tanto ao nível da adesão entre o inserto metálico e a camada de polímero, bem como no empeno da peça, originado pelas contrações do polímero. A muito baixa condutividade térmica dos polímeros, em comparação com os metais, é uma das causas mais significativas da contração volumétrica do polímero, contribuindo negativamente para o aspeto final da peça. Após a extração das peças, as tensões tendem a relaxar durante o processo de arrefecimento até à temperatura ambiente. Ainda se verificou que o tempo de compactação e a temperatura do polímero têm o maior impacto no empeno, sendo que aumentando o tempo de compactação até um certo ponto, diminui o empeno da peça.

Tseng et al. [15] consideram que a geometria pré-definida e a seleção adequada dos materiais das camadas do substrato ou inserto e da camada de polímero afetam significativamente o resultado final da peça. Quando a primeira camada de material ou o inserto têm uma geometria fixa, o empeno irá depender da espessura da camada do polímero. Consideram que uma distribuição assimétrica da temperatura, induzirá tensões térmicas não balanceadas, afetando as duas camadas de material ao mesmo

tempo. Este estudo verificou ainda que o constrangimento causado por um inserto metálico é maior que o causado por um inserto de plástico.

Jin et al. [16] analisaram a distorção da peça após a extração da mesma. Neste estudo foi possível observar que as diferenças de espessura ao longo do inserto metálico são o factor com maior influência na distorção da peça, após a sua extração, sendo este facto causado pelas diferenças de temperatura na secção transversal, conduzindo a tensões residuais diferentes entre a secção com maior espessura e a secção mais fina.

1.6 Simulação numérica na sobre-moldação

A simulação numérica aplicada à produção industrial foi uma das revoluções tecnológicas com maior impacto na moldação por injeção nas últimas décadas. A previsão e/ou simulação do comportamento e desempenho de peças sobre-moldadas é uma ferramenta que se vem tornando extremamente importante, no que à prevenção de danos de processamento e de imagem das próprias empresas diz respeito. A capacidade de se prever um eventual defeito que, muitas vezes, não se manifesta logo a seguir ao processo de moldação por injeção, pode acautelar a distribuição do produto defeituoso no mercado, e consequentemente, eventuais danos relacionados com o marketing do produto e da empresa. [17].

Numa visão mais ampla, o desenvolvimento de sistemas CAD/CAE/CAM permitiram uma rápida transformação de ferramentas bidimensionais em modelos tridimensionais. Para além dos sistemas CAD/CAE/CAM para o suporte no design e produção, a simulação numérica computacional permitiu estender a sua aplicação a outras áreas da moldação por injeção, nomeadamente bases de dados sobre materiais plásticos, otimização das variantes do processo, controlo do processamento das máquinas de injeção, entre outras soluções. Segundo Zhou et al. [18], a introdução da simulação numérica na moldação por injeção apresenta vários benefícios, entre os quais o aumento da produtividade, aumento da qualidade da peça, aumento da rapidez no cumprimento de prazos de entrega e maior efetividade na utilização dos recursos existentes. Os autores apresentam alguns exemplos desses mesmos benefícios como a diminuição dos erros nos desenhos, aumentando a qualidade do molde e a velocidade

de entrega dentro no prazo estabelecido; melhor comunicação entre designers, desenhistas de moldes e engenheiros; aumento da precisão na maquinação dos moldes; aumento do controlo das máquinas de injeção, garantindo a repetibilidade do processo e obtenção de peças cada vez mais confiáveis; padronização de peças e componentes, reduzindo a necessidade de supervisão do processo dentro da empresa; maior rapidez e precisão na preparação da orçamentação e ainda uma maior e mais eficaz capacidade de resposta às necessidades de mercado. O controlo da qualidade do processo foi revolucionado pela introdução da modelação e simulação numérica, pelo facto de muitas análises numéricas promoverem um melhor entendimento do processo e das inter-relações entre os vários parâmetros do mesmo, contribuindo para uma melhor compreensão de fenómenos como contrações do polímero, distorções, empenos, entre outros defeitos, durante a injeção e após a extração da peça. Atualmente é possível prever e otimizar a qualidade do produto final a um preço mais baixo, evitando o uso do velho método de tentativa-erro durante a fase de produção que era bastante mais dispendioso.

Apesar de todas as vantagens, existem limitações inerentes à aplicação da simulação numérica. Os pressupostos e simplificações tidos em conta na utilização da simulação numérica podem originar discrepâncias entre o modelo real e o modelo obtido por simulação. É também necessária alguma prática na utilização destas ferramentas, sendo que o utilizador deve ter capacidades no que diz respeito não só à modelação e ao software de simulação, mas também possuir capacidades relacionadas com o processo de moldação por injeção e de design para a moldabilidade. Esta combinação de factores, leva a que o utilizador esteja melhor preparado para interpretar os resultados obtidos e poder otimizar o processo.

1.6.1 Ferramentas de simulação numérica

A evolução dos métodos computacionais na simulação do processo de moldação por injeção levou a que se comesçassem a comercializar *softwares* como o *MoldFlow* ou o *Moldex3D*. Muitos desses *softwares* CAE conseguem sugerir as condições óptimas de processamento, usando certos critérios, com o objetivo de se produzirem peças cada vez melhores. Vários autores têm vindo a utilizar as diferentes ferramentas de simulação

numérica e a seguir métodos de análise que combinam os *softwares* CAD para design e modelação das peças com *softwares* de simulação do processo de moldação por injeção que utilizam o método dos elementos finitos (FEM) para uma optimização e refinamento das malhas estruturais.

Izadi et al. [14] procederam a uma análise numérica com o objetivo de estudar o empeno de dois provetes híbridos, constituídos por uma camada de polímero e outra de metal. Inicialmente, através de um *software* CAD modelaram a camada de polímero. De seguida, o modelo geométrico da camada de polímero foi importado para o *Hypermesh* (Altair Engineering Inc., 2015) para se obter uma malha, composta por elementos tetraédricos. Após refinar a malha, importaram o modelo para o *Moldflow Plastic Insight* (Autodesk, 2012), onde foram modelados o sistema de alimentação e a localização do ataque, tendo em conta as características prévias do molde. Foram ainda definidos os parâmetros da máquina e as condições de processamento no *Moldflow* e, após as análises relativas ao enchimento do molde, compactação do polímero e arrefecimento, as tensões residuais geradas na camada de polímero foram importadas para o *Abaqus* (versão 6.13, Dassault System). Neste *software* procederam à junção do inserto metálico e, através de uma análise de elementos finitos (FEM), foi obtido o valor do empeno no provete híbrido (polímero-metal) devido às tensões residuais desenvolvidas durante a simulação do processo de injeção e ainda se obtiveram as propriedades mecânicas do híbrido, utilizando um teste de flexão.

Jin et al. [16] analisaram a estrutura da parte traseira de um telemóvel, em que a carcaça era de policarbonato e o inserto metálico de magnésio. Tendo este artigo como objetivo o estudo da distorção na peça sobre-moldada, foi utilizado o *Moldflow* para uma simulação do processo de moldação por injeção com o inserto de magnésio. Os resultados das tensões residuais denotavam uma falta de detalhe na análise estrutural e em como as próprias tensões afetavam o formato e a performance da peça. A interface do *Abaqus* para o *Moldflow* foi utilizada para traduzir a informação proveniente do *Moldflow* em informação capaz de ser lida pelo *Abaqus*. Foi transferido o histórico de resultados das tensões residuais para o *Abaqus*, sendo que através dessa informação foi analisada a distorção por estas causada. Como não foi possível prever com precisão a tensão residual gerada no inserto metálico, utilizou-se o *Deform 3D*, *software* de

elementos finitos que contempla uma análise elástica-plástica e termo-mecânica, para estudar as tensões residuais do inserto metálico. Com auxílio de uma linguagem de programação *FORTTRAN* foi possível converter a informação relativa ao inserto metálico num formato capaz de ser lido pelo *Abaqus*. Posteriormente, procederam à junção das geometrias do polímero e do inserto metálico, com os respetivos mapeamentos das tensões residuais e, finalmente, obteve a deformação do modelo depois da extração, através do *Abaqus*.

Grujicic et al. [19] utilizaram um *software* CAD, o *CATIA V5 (Dassault Systems)*, para gerar um modelo inicial de uma estampagem de metal preenchida com um material termoplástico. Os *softwares* CAD como o *CATIA V5* permitem gerar malhas que, neste caso, não são suficientemente refinadas para simular corretamente a interface entre o polímero e o metal. A correspondência da malha nessas interfaces é importante para este tipo de componentes, nomeadamente no que diz respeito à transferência das cargas entre materiais. Para ultrapassar essa limitação, foi utilizado um *software* CAE de pré e pós-processamento, o *HyperMesh*. Como a peça é desenhada para possuir força estrutural e rigidez, procederam a uma optimização baseada numa análise linear estática e elástica através do *OptiStruct (Altair)*. A peça em causa é concebida para possuir uma resistência à encurvadura, portanto a análise subjacente deve ter um carácter não linear, algo limitativo para este *software*. Para suprimir essa limitação e optimizar a simulação numérica, foi utilizada uma análise não linear por elementos finitos através do *Abaqus*. Por fim, com o objetivo de validar o design e, consequentemente, a produção da peça, procedeu a uma análise de moldação por injeção, através do *MoldFlow* (versão 6.1, *Moldflow Corporation*). A partir daí retiraram-se dados relativos a tempos de ciclo, linhas de soldadura, fugas de ar, arrefecimento, enchimento da peça, entre outros fatores que permitiram a validação da qualidade e produção da peça sobre-moldada. Cheng et al. [20] e Porto T. et al. [21] utilizaram um *software* comercial de elementos finitos, o *ANSYS*, para modelar os respetivos modelos de estudo. Este *software* permite obter uma optimização do refinamento das respetivas malhas, com particular relevância para as malhas dos insertos. A optimização proporcionada por este programa permitiu-lhes poupar recursos computacionais e tempo de simulação durante as respetivas análises. Os primeiros tinham como objetivo

estudar as propriedades mecânicas de uma junta compósito-metal com um design inovador do inserto metálico, onde após a utilização do *ANSYS* com o método dos elementos finitos (FEM) foi possível analisar a distribuição de tensões e a resistência à tracção da junta. Concluíram que as tensões de corte são a maior causa da falha da junta, podendo aumentar a espessura da camada de resina e a sua plasticidade para contornar esse problema. Os segundos procederam a um estudo da produção de um compósito polimérico usando um compósito líquido como material moldante. Utilizaram o *ANSYS* para simular a fluidez das frentes de enchimento e distribuição de tensões dentro do molde com um inserto cerâmico, concluindo que o número de insertos afeta o tempo de enchimento enquanto que a distância entre insertos não tem qualquer influência no processo.

Baseado na análise da utilização feita dos diferentes programas de simulação numérica pelos vários autores, é possível constatar a existência de *softwares* específicos para cada função e as respectivas limitações. Em estudos de comportamento de peças sobre-moldadas durante o processamento e em serviço, são utilizados *softwares* para três áreas específicas: *software* CAD para modelação dos diversos modelos com ou sem insertos incluídos; *software* CAE de modelação e refinamento das malhas dos modelos com especial enfoque nas malhas dos insertos, utilizando, geralmente, o método dos elementos finitos (FEM); *software* de simulação numérica do processo de moldação por injeção. São utilizados outros programas com o intuito de compilar informações provenientes de diferentes linguagens, servindo como ponte de ligação entre os vários âmbitos da simulação numérica.

Em termos de *softwares* CAD, os mais utilizados são o *CATIA*, *SOLIDWORKS* ou *Autodesk Inventor*, sendo que estes apesar de terem capacidade de gerar malhas bem refinadas, não são suficientes para representar corretamente a simulação. Uma das limitações é uma correta geração da malha, tanto ao nível do inserto como, principalmente, ao nível da interface entre o inserto metálico e a camada de polímero. Quando se consegue alcançar uma malha bastante refinada nessa interface, é possível simular de uma forma fidedigna a transição de cargas e as tensões residuais geradas pelas mesmas, da camada de polímero para o inserto metálico. Por vezes, para aumentar o refinamento de cada um dos componentes de uma peça sobre-moldada, o

inserto metálico é modelado em separado da camada de polímero, tal como a geração das respectivas malhas. Para colmatar essas limitações, o procedimento geralmente seguido é a utilização de um *software* de pré ou pós-processamento de malhas, dos quais normalmente constam o *HyperMesh* e o *Deform 3D*. Estes têm como principal função a correção de erros que causam falhas na simulação do processo de injeção, sendo que os erros mais comuns são: a interseção de elementos, sobreposição de elementos e buracos na malha. Os três tipos de erros estão ilustrados na Figura 10.

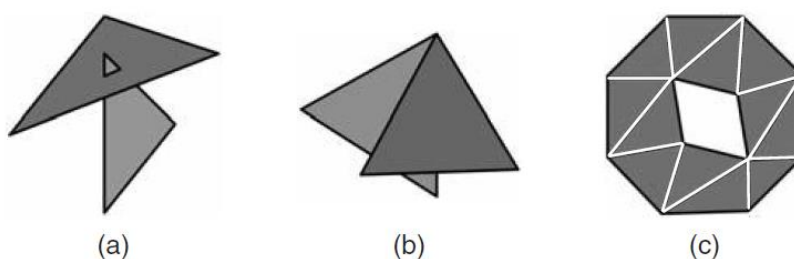


Figura 10 - Erros mais comuns nas malhas: a) interseção; b) sobreposição; c) buraco [18]

O *Abaqus* ou o *ANSYS* são *softwares* CAE que têm a capacidade de modelar as geometrias pretendidas e ao mesmo tempo gerar malhas bastante refinadas, que são utilizados com maior frequência. Quando as partes são modeladas em separado, estes *softwares* são utilizados para a montagem e ligação das duas partes, proporcionando a correta interação entre o inserto metálico e a camada de polímero. Nos estudos analisados, estes programas são utilizados para se procederem às simulações posteriores à moldação por injeção, onde são importados o histórico dos dados relativos aos vários parâmetros para se poder avaliar com precisão e correção a performance da peça sobre-moldada em serviço. Para avaliar os parâmetros durante o processamento das peças sobre-moldadas, utilizam-se *softwares* de simulação do processo de moldação por injeção, normalmente o *Moldflow*, que produz resultados indicativos de todos os parâmetros importantes a analisar.

1.6.2 Metodologia de simulação numérica adotada

Após uma análise das metodologias utilizadas por diferentes autores, dos softwares e respectivas limitações, procedeu-se a uma avaliação de qual metodologia de simulação numérica a adotar durante esta dissertação. O objetivo deste trabalho contempla a análise de peças sobre-moldadas durante a sua produção e em serviço, portanto para isso, deve-se adotar uma metodologia de simulação reológica e estrutural que se possa, conjuntamente, aplicar à maioria das situações e às regras projetuais.

A metodologia começa com a modelação das peças sobre-moldadas utilizando um software CAD, sendo que neste caso particular a peça foi gentilmente cedida. Posteriormente procede-se à modelação do processo de moldação por injeção no AMI® (*Autodesk Moldflow Insight*, 2016) e são obtidos todos os valores dos parâmetros aquando da produção da peça sobre-moldada. Se necessário, a malha gerada pelo AMI® pode ser refinada utilizando algum software de pós-processamento da malha, como o *Hypermesh*, onde serão corrigidas eventuais falhas e erros, já abordados anteriormente (Figura 10). Este tratamento da malha é importante na correta simulação do inserto metálico e da sua interação com o polímero. Após esta fase, procede-se à simulação da peça sobre-moldada em serviço, onde são importados os dados relativos ao processamento da peça e, desta forma, proporcionar uma análise fidedigna desta em serviço, utilizando o ANSYS. Esta metodologia pode ser adotada para qualquer peça que seja analisada durante este trabalho e está esquematizada na Figura 11.

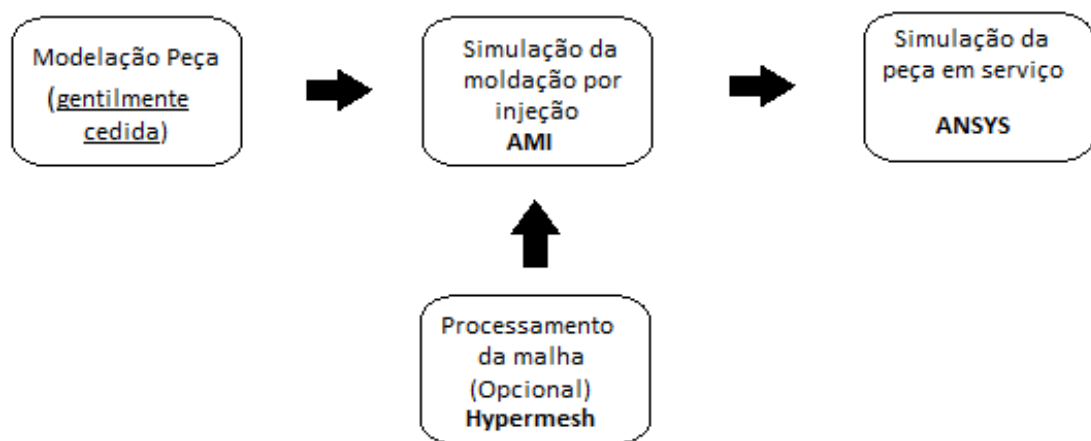


Figura 11 - Esquema da Metodologia simulação numérica

3. Metodologia de Análise

O objetivo primordial deste estudo consiste em prever o comportamento de peças sobre-moldadas durante a sua fase de processamento e, posteriormente em serviço. Com esse intuito foram estabelecidos os procedimentos para uma correta modelação numérica do caso de estudo em questão e consequente análise do seu processamento. O estudo consistiu na modelação de uma peça sobre-moldada em AMI®, seguindo-se as respetivas análises numéricas. Uma dessas simulações numéricas corresponde a uma solução otimizada, obtida com auxílio de uma ferramenta de otimização intrínseca ao *software*, neste caso um módulo de *Design of Experiments* (DOE). Posteriormente foi importado o histórico de processamento da peça sobre-moldada para um *software* de simulação estrutural, onde foi avaliada a sua influência relativa no comportamento mecânico da peça aquando em serviço.

3.1 Caso de Estudo – Desenvolvimento do Modelo

O caso de estudo selecionado é uma peça comercializada pela OLI – Sistemas Sanitários S.A, um casquilho que permite fazer a ligação à torneira de bóia do mecanismo do autoclismo. À semelhança de qualquer peça sobre-moldada, o modelo de estudo é constituído por duas partes distintas: um inserto metálico (Figura 12) e uma parte de plástico (Figura 13).



Figura 12 - Modelo CAD do Inserto Metálico

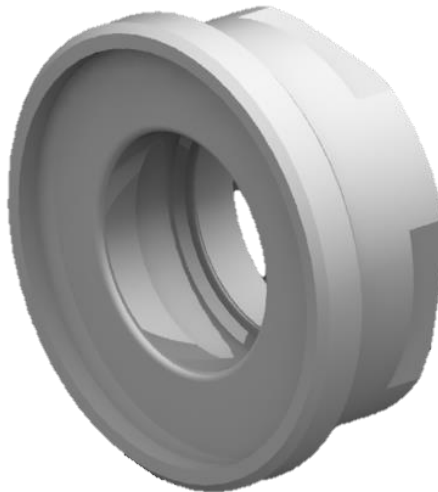


Figura 13 - Modelo CAD da parte plástica

Uma das motivações para o estudo desta peça em particular, surge do facto desta apresentar um histórico de fraturas da camada de plástico situada no fim da frente de enchimento, onde se forma grande parte da linha de soldadura (Figura 14). Durante o estudo em questão, à zona identificada será dada particular atenção, de modo a identificar estratégias conducentes à minimização da ocorrência deste problema, quer imediatamente após o processamento, quer aquando em serviço.



Figura 14 - Peça fraturada (adaptado de [2])

As diferentes partes foram modeladas com recurso a um *software* CAD e posteriormente montadas nesse mesmo software, formando a peça final representada na Figura 15.

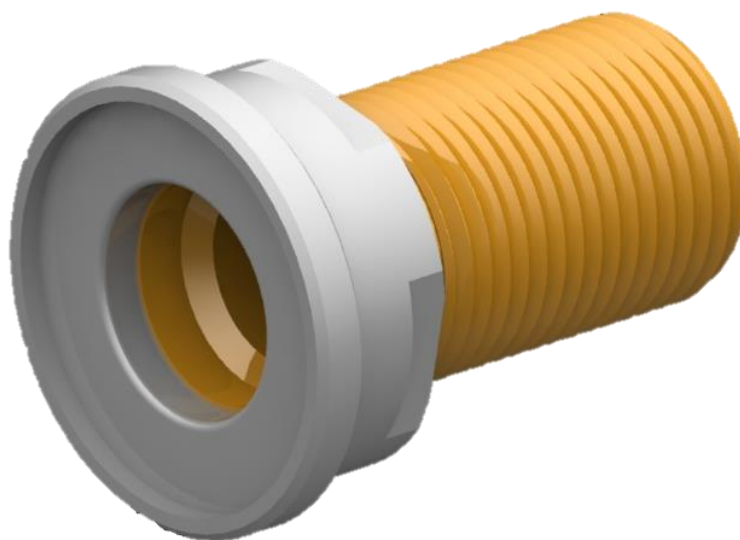


Figura 15 - Modelo CAD da Peça Sobre-Moldada

3.1.1 Aplicação das regras de design para insertos metálicos

Na Figura 12 é possível constatar que o inserto cumpre algumas regras de *design* para a moldabilidade para peças sobre-moldadas apresentadas na secção 2.4. A existência de saliências no inserto promovem a adesão da camada de polímero ao inserto metálico, sendo que a técnica específica utilizada neste inserto é uma das exemplificadas na Figura 9. O entalhe presente no inserto cria um bloqueio mecânico na parte plástica e o facto do inserto sobressair da camada de polímero no seu diâmetro interno, evitam que esta se desprenda do inserto. Estas constituem algumas das medidas de *design* tomadas na fase de projeto, tendo em vista a qualidade da peça.

3.1.2 Desenho Técnico e Montagem da Peça

De forma a visualizar os pormenores da peça do caso de estudo, apresenta-se na secção dos Anexos o desenho técnico da peça, gentilmente cedido pela OLI – Sistemas Sanitários S.A, no qual estão referenciadas as dimensões consideradas mais importantes para o estudo.

De forma a ser mais fácil perceber a função da peça em questão, a Figura 16 representa uma montagem da peça em serviço.



Figura 16 - Montagem da peça em serviço (cortesia OLI – Sistemas Sanitários S.A)

A peça em estudo representa um casquilho com rosca de latão e cabeça de POM que tem como função criar a ligação da água corrente trazida por uma mangueira até à torneira de bóia, mecanismo que tem como funcionalidade o controlo do nível da água dentro do depósito e o enchimento deste quando se encontra vazio.

3.1.3 Materiais Utilizados

A peça sobre-moldada é constituída por duas partes distintas e, como tal, existem dois materiais diferentes que a constituem. O inserto é feito de latão, caracterizado como sendo uma liga metálica de cobre e zinco que tem como principais características a resistência ao impacto, a sua grande maleabilidade e apresentar uma aparência dourada brilhante [22]. O material do molde utilizado neste estudo é o Aço P-20 genérico. Ambos os materiais estão presentes na base de dados do AMI® e as suas propriedades podem ser vistas com maior detalhe na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do inserto de Latão 60-40 genérico e do molde de Aço P-20 genérico

<i>Propriedades</i>	<i>Latão 60-40</i>	<i>P-20</i>	<i>Unidades</i>
Densidade (ρ)	8,52	7,80	[g/cm ³]
Calor específico (c_p)	385	460	[J/kg °C]
Condutividade Térmica (k)	110	29	[W/m °C]
Coefficiente de Expansão Térmica (α)	20×10^{-6}	12×10^{-6}	[1/°C]
Módulo de Elasticidade (E)	100,0	20,5	[GPa]
Coefficiente de Poisson (ν)	0,33	0,29	-

No que diz respeito à parte plástica, o material em questão é o POM, Poli(óxido) de metileno, industrialmente conhecido como poliacetal, sendo um termoplástico semicristalino criado em 1958 que tem como principais aplicações peças técnicas (rodas dentadas, cames e outros mecanismos), componentes para automóveis (tampas de

depósitos de combustível, mecanismos de segurança, ventiladores), parafusos e acessórios para tubagens. Por questões de saúde humana, a utilização deste termoplástico exige um cuidado acrescido, sendo que as temperaturas de processamento não devem ser superiores às recomendadas (220 – 230 °C) e o tempo de residência deve ser minimizado. A cristalização secundária pós-moldação é um processo que é característico do poliacetal e que pode ter implicações dimensionais significativas na peça. A utilização de baixas temperaturas do molde (normalmente inferiores a 60°C) inibe o processo de cristalização durante o seu processamento, induzindo um estado meta-estável na estrutura do polímero. Como consequência, o material ao terminar o seu processo de cristalização, provoca distorções significativas na respectiva peça [3].

O material polimérico utilizado durante as simulações é um POM, comercialmente conhecido como Hostaform C 27021 GV3/30 fabricado pela Celanese que está presente na base de dados do AMI®. De acordo com os dados do fabricante [23] é um copolímero de acetal reforçado com 30% de esferas de vidro e que apresenta algumas características como ser de escoamento muito fácil, empeno reduzido, grande resistência à degradação térmica e à oxidação. A escolha do material prende-se também com o facto do coeficiente de expansão térmica do POM reforçado com esferas de vidro ser inferior ao POM normal, contribuindo para que o seu comportamento termo-mecânico seja menos díspar em relação ao comportamento do latão. Este material tem mais vantagens do ponto de vista dimensional, pelo facto de se revelar menos suscetível a empenos, cumprindo mais facilmente as cotas críticas do projeto. As suas propriedades podem ser vistas com mais detalhe na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do POM "Hostaform C 27021 GV3/30"

	Propriedades POM (Acetal)		Unidades
Condições de Processamento Recomendadas	Temperatura Molde (T_{molde})	90	[°C]
	Temperatura Fundido (T_{fundido})	210	[°C]
	Temperatura Extração ($T_{\text{extração}}$)	131	[°C]
Propriedades Reológicas	Temperatura de transição (T_g)	145	[°C]
Propriedades Térmicas	Calor Específico (c_p)*	1998	[J/kg °C]
	Condutividade Térmica (k)*	0,29	[W/m °C]
Propriedades Mecânicas	Módulo de Elasticidade (E)	E_1 3800	[MPa]
		E_2 3800	[MPa]
	Coeficiente de Poisson (ν)	ν_1 0,38	-
		ν_2 0,38	-
	Módulo de Corte (G)	1375	[MPa]
	Coeficiente de expansão térmica (α)	α_1 80×10^{-6}	[1/°C]
		α_2 80×10^{-6}	[1/°C]

*Temperatura de medição: 233,5°C

3.1.4 Expansão Térmica dos Materiais

Um dos principais problemas da moldação por insertos é a contração do plástico que rodeia o inserto metálico originando tensões elevadas dentro do molde. Esta é considerada a principal causa de uma possível rutura da camada de plástico durante o processo de moldação e em serviço, geralmente apelidada de tensão circunferencial [2].

As peças obtidas pela técnica da moldação por insertos são constituídas, normalmente, por um polímero e um metal, à semelhança do que acontece com a peça selecionada para este caso de estudo, onde existe uma interface de contacto entre dois materiais com características termomecânicas diferentes podendo causar alguns problemas na qualidade final da peça. A expansão térmica dos diferentes materiais desempenha um papel de extrema importância na obtenção da peça, sendo definida como um fenómeno que se deve ao aumento do volume de um corpo devido ao aumento da sua temperatura. O aumento da temperatura causa um aumento da agitação das moléculas e, como consequência, aumenta a distância entre as moléculas, expandindo o volume do corpo (Figura 17).

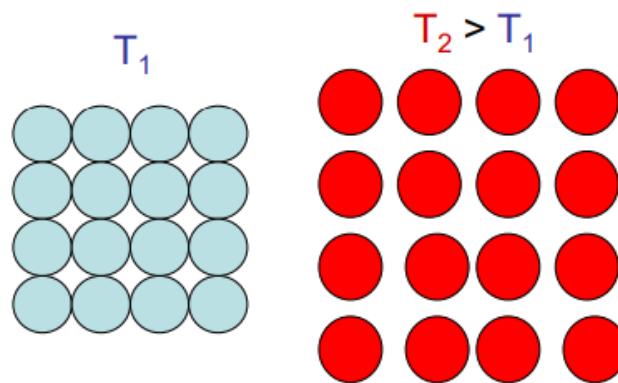


Figura 17 - Fenómeno da Expansão Térmica Superficial

Geralmente o coeficiente de expansão térmica dos plásticos é maior que o dos metais, levando a que nas zonas de contacto entre os materiais se desenvolvam tensões residuais, causadas pelas diferentes expansões de cada material e respectivos empenos. Quando sujeitos ao mesmo estímulo de temperatura, o material plástico terá uma expansão linear e volumétrica muito maior que o metal, sendo normalmente este facto

contrariado numa fase projectual, atribuindo uma espessura maior ao material plástico, aplicando uma regra de design para a moldabilidade para peças com insertos metálicos. A espessura das camadas de polímero deve ser suficiente para aguentar as tensões induzidas durante a moldação e em serviço estando diretamente ligada ao valor do coeficiente de expansão térmica.

Zhiltsova et al. [2] estudaram uma forma de contornar este problema, procedendo a um pré-aquecimento do inserto metálico a várias temperaturas. Concluíram que o pré-aquecimento do inserto antes da incorporação deste na cavidade moldante, faz aumentar o coeficiente de expansão térmica do metal, levando a que haja um relaxamento das tensões na interface de contacto entre os dois materiais, diminuindo os empenos da parte plástica e prevenindo uma eventual rutura posterior à moldação.

Berins [12] considera que uma escolha correta do material dos insertos é essencial pelo facto dos materiais que constituem as peças sobre-moldadas possuírem diferentes coeficientes de expansão térmica. A espessura mínima da camada de material que envolve o inserto é dependente de vários fatores entre os quais o tipo de material plástico, a contração do polímero, o módulo de elasticidade do material, a gama de temperaturas em que a peça irá ser aplicada, o design do inserto, mas principalmente dos diferentes coeficientes de expansão térmica dos materiais. Através da expansão térmica dos materiais é possível estabelecer padrões aceitáveis de espessura mínima das paredes da camada de polímero em função do diâmetro dos insertos, em particular para alguns tipos de *design*.

A peça do caso de estudo apresenta um inserto de latão e uma camada envolvente constituída por POM que apresentam coeficientes de expansão térmica $\alpha=20 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ e $\alpha=80 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, respectivamente. Como o inserto tem um perfil oco possui um diâmetro interno e um diâmetro externo, portanto o diâmetro a considerar é a diferença entre os dois. De acordo com a Tabela 10 (Anexo A), o rácio do diâmetro do inserto comparando com a espessura da camada de POM é aproximadamente 1, portanto a espessura da camada de POM deve ser no mínimo a dimensão do diâmetro do inserto. Considerando estes factores, o caso de estudo cumpre todos os requisitos, sendo que o diâmetro do inserto é aproximadamente 2,5mm e a camada de polímero tem como espessura mínima de cerca de 4mm.

3.1.5 Comportamento mecânico dos polímeros

O comportamento mecânico dos polímeros é caracterizado através de várias propriedades como o módulo de Young (E), limite de elasticidade representado pela tensão de cedência (σ_y) e a resistência à tração, à semelhança do que acontece com os metais. As propriedades mecânicas dos polímeros, na sua maioria, são muito sensíveis à taxa de deformação, à temperatura e à natureza química do ambiente envolvente, como a presença da água, oxigénio, solventes orgânicos, entre outros. A forma de caracterizar mecanicamente o comportamento do material baseia-se na curva tensão-deformação, sendo que os polímeros apresentam três componentes típicos que podem ser vistos na Figura 18.

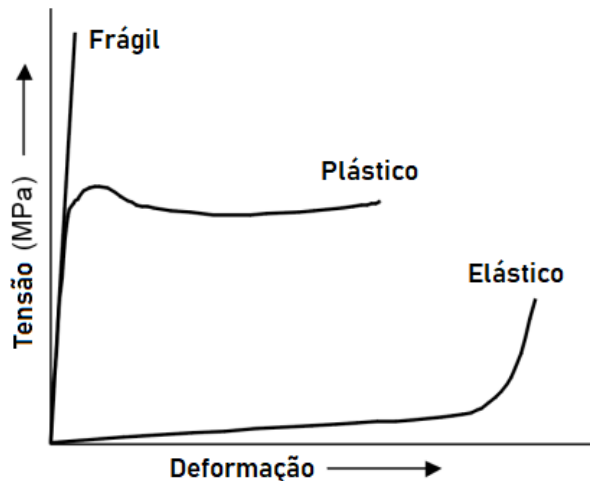


Figura 18 - Comportamentos mecânicos típicos dos polímeros (adaptado de [24])

Um polímero caracteriza-se como frágil se fratura enquanto se deforma elasticamente. Em relação ao polímero plástico, em primeiro lugar apresenta uma deformação elástica seguida da cedência do material para uma região de deformação plástica, enquanto que um polímero com o comportamento elástico (elastómero) mostra uma deformação totalmente elástica que se prolonga até grandes níveis de deformação[24].

O polióxido de metileno ou acetal (POM) é um termoplástico semicristalino que apresenta um comportamento dúctil à temperatura ambiente (23°C), segundo o qual depois de ser exercida uma força, este deforma plasticamente até à fratura, após ser

atingida a tensão de cedência. No caso do POM em estudo reforçado com esferas de vidro, apresenta uma tensão de cedência de 38MPa.

Numa análise de elementos finitos (FEA) existe a necessidade de se proceder a uma correta análise numérica durante as simulações estruturais que está intrinsecamente relacionado com o comportamento do material em estudo. Em várias análises feitas, apesar de serem materiais com um comportamento elástico-plástico, a sua complexidade de simulação faz com que sejam simulados como tendo um comportamento linear elástico.

Sanchez-Caballero et al. [25] pretendiam estudar as possíveis causas para as fraturas ocorridas em elos de uma correia de plástico que formam uma passadeira rolante. Devido à complexidade dos modelos matemáticos que constituem uma análise que engloba a plasticidade do material, assumiram um comportamento linear elástico do mesmo, no qual, teoricamente, a fratura se iniciaria na tensão de cedência, sabendo que a resistência à tração seria um pouco menor. Apenas definiram parâmetros como o módulo de Young, coeficiente de Poisson e tensão de cedência, caracterizando o comportamento linear elástico. O estudo permitiu concluir que a falha era causada por um mau dimensionamento da espessura da peça.

Francis D. K. et al. [26] procederam a uma análise de falha de um gancho de fixação de polipropileno (PP). Após análises experimentais conseguiram constatar a existência de porosidades aquando da produção desta peça (moldação por injeção) com recurso a uma tecnologia de raio-X tridimensional. Com o intuito de verificarem que consequências na fratura da peça estes defeitos poderiam causar, procederam a uma análise de elementos finitos. Ao utilizarem modelos matemáticos teóricos verificaram que as tensões obtidas não ultrapassam a tensão de cedência do PP, não sofrendo deformação plástica. Devido a esse facto utilizaram um modelo linear elástico para caracterizar o comportamento mecânico do PP durante as simulações numéricas, concluindo que a porosidade criada durante o processo de injeção da peça contribuía para a redução da durabilidade da mesma.

3.2 Modelo de Simulação Numérica

A utilização de *softwares* CAD/CAE na indústria de moldes é cada vez mais uma realidade. São evidentes as vantagens em termos da redução dos tempos de produção, da facilidade de se procederem a alterações no decorrer da produção que, no fim, culminam numa redução de custos que se torna bastante apelativa para as empresas. A utilização destas ferramentas permite não só o desenvolvimento de novas peças com geometrias cada vez mais complexas, como também o desenvolvimento das próprias ferramentas moldantes.

O *software* utilizado para estudar o processo de moldação do caso de estudo foi o *Autodesk Moldflow Insight 2016®*, no qual é possível simular vários processos de moldação por injeção, desde o processo mais simples até aos processos multimaterial, como é o caso da moldação por insertos. Os estudos proporcionados pelo *software* podem contemplar o controlo de vários parâmetros do processo, desde o enchimento ao arrefecimento, resultando na previsão de valores de contrações e empenos, normalmente relacionados com critérios de qualidade da peça [27]. A possibilidade de um estudo exaustivo de simulações numéricas e otimização de condições de processamento proporcionados pelo AMI® evita a necessidade da utilização de protótipos durante o projeto e fabrico do molde e ainda permite reduzir significativamente o tempo de arranque da produção por fornecer as condições mais assertivas de processamento.

Relativamente ao caso de estudo, a camada de POM e o inserto de latão foram modelados usando elementos tetraédricos com quatro nós. A utilização deste tipo de elementos constitui uma malha tridimensional que proporciona uma representação mais realista do modelo em estudo, sendo também o tipo de malha mais indicado para modelos com geometrias complexas e variações de espessura. A representação esquemática da malha utilizada no modelo em estudo pode ser vista na Figura 19.

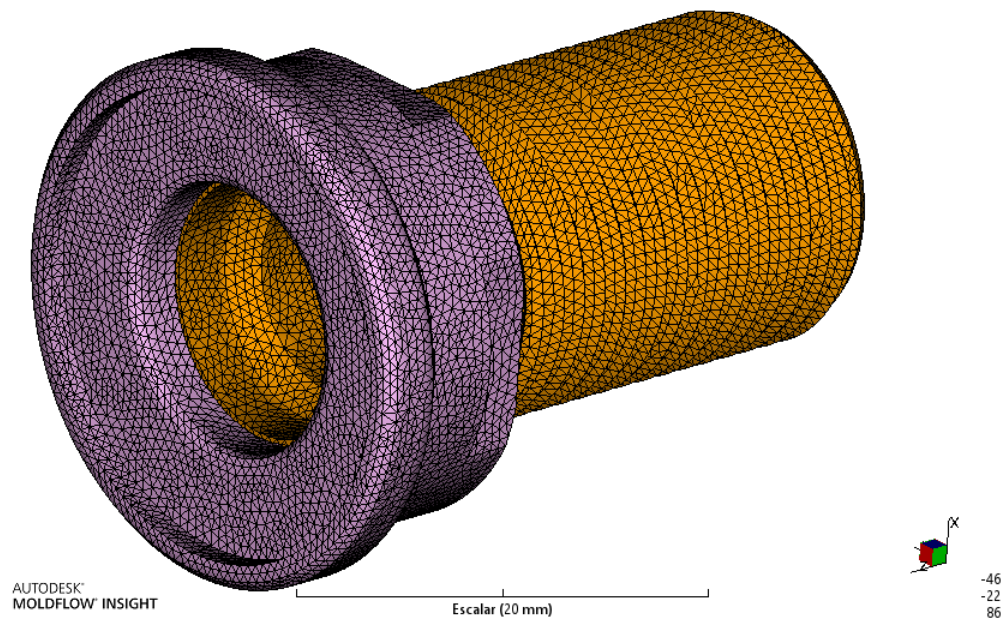


Figura 19 - Representação Esquemática do Modelo com a malha tridimensional

Os modelos do inserto de latão e do subcomponente de POM e as respectivas discretizações em malhas 3D apresentam-se na Figura 20 e na Figura 21.

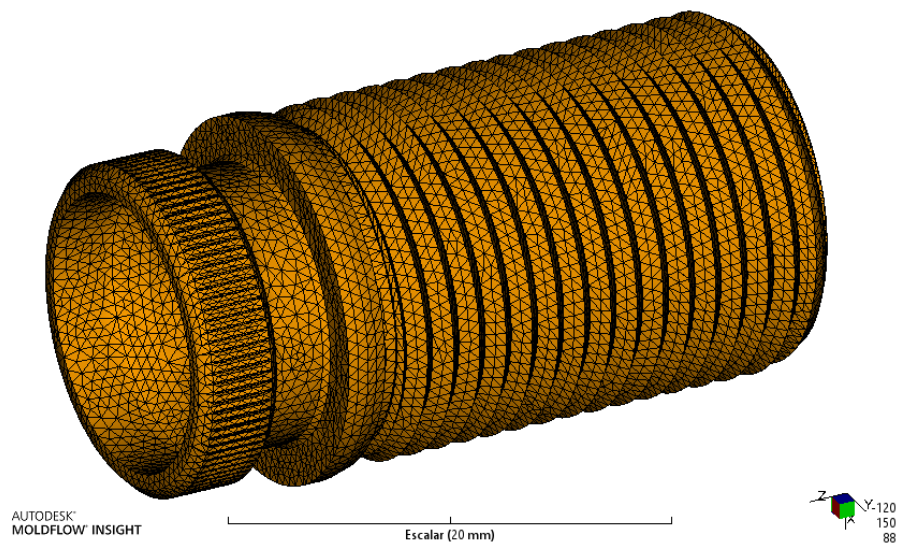


Figura 20 - Representação Esquemática da malha 3D do inserto

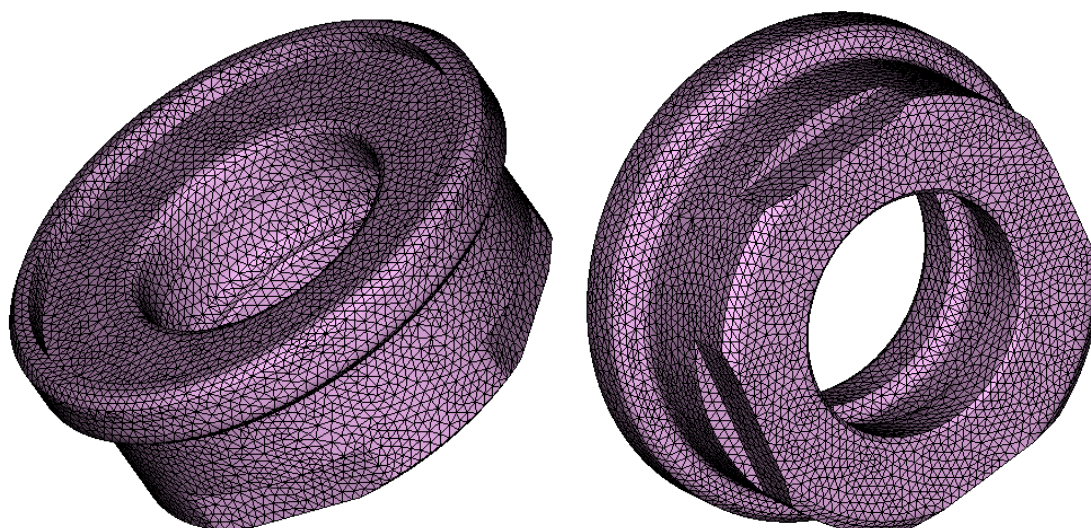


Figura 21 - Representação Esquemática da malha 3D da parte plástica

3.2.1 Estudo de convergência do modelo

O AMI® permite a transformação geométrica dos modelos provenientes de um *software* CAD, neste caso o *Solidworks 2018®*. O inserto e a parte plástica foram importados separadamente e, posteriormente, alinhados e ajustados. A geração da malha tridimensional é feita simultaneamente nas duas partes que constituem o modelo, existindo faces comuns em que as duas partes estão em contacto. Para que a simulação proporcione resultados com maior fiabilidade, é necessário utilizar a opção de alinhamento dos nós das faces comuns [27].

Na tentativa de estudar qual a malha que proporcionaria os melhores resultados conjuntamente com um tempo de simulação adequado, procedeu-se a um estudo de convergência do modelo, de modo a estabelecer o domínio de cálculo que melhor se adequa aos recursos computacionais disponíveis. O tipo de elemento utilizado é o tetraedro de 4 nós, designação atribuída no AMI® ou SOLID45 segundo o ANSYS [28].

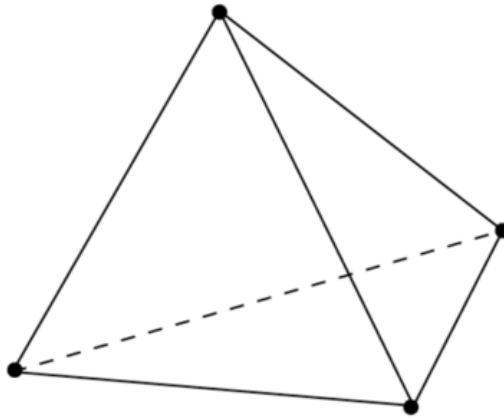


Figura 22 - Tetraedro de 4 nós (adaptado de [28])

A análise teve por base a variação do tamanho do lado do elemento da malha tridimensional, onde em cada uma das simulações foram verificadas algumas estatísticas relativas à malha, nomeadamente, o número de elementos, o número de nós, a razão de aspeto máxima e razão de aspeto média. É recomendado que os valores de razão de aspeto (também conhecido como fator de forma) estejam compreendidos entre 1 e 50, para que se considere válida a malha aplicada [27]. Para além das estatísticas da malha, foram recolhidos valores relativos a dois parâmetros de análise (tempo de enchimento e deflexão radial máxima) e ainda o tempo de cálculo de uma análise de enchimento, compactação e empeno. Os dados recolhidos estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Estudo de Convergência do Modelo

DCE* (mm)	Número tetraedros	Número nós	Razão aspeto máxima	Razão aspeto média	Tempo Simulação (min)	Tempo enchimento (s)	Deflexão Radial Máxima (mm)
0.42	1073138	201953	33.63	2.74	61	0.9165	0.0983
0.50	754658	141756	57.48	2.85	43	0.9172	0.0962
0.60	573781	107687	29.68	3.05	25	0.9183	0.0945
0.75	417721	77983	35.45	3.34	18	0.9189	0.0956
0.90	317945	59020	37.41	3.40	10	0.9195	0.0923
1.50	143809	26393	30.70	4.37	5	1.0230	0.0924

*DCE – Dimensão Característica do Elemento.

O objetivo desta análise foi verificar qual a influência do número de elementos de uma malha na qualidade dos resultados obtidos e, por sua vez, verificar se uma simulação que requer menos tempo e que possui uma malha não tão refinada proporciona resultados igualmente fidedignos. A partir dos dados recolhidos, optou-se por escolher a malha tridimensional em que o lado do elemento tem uma dimensão característica de 0,6mm pelo facto da variação dos resultados ser da ordem das milésimas, o que não representa uma diferença muito significativa na qualidade dos resultados. Além de apresentar 573781 elementos tetraédricos e uma razão de aspeto média de 3,05 (valor considerado bastante aceitável), apresenta ainda uma razão de aspeto máxima mais baixa, comparativamente com as outras simulações e uma duração da análise de 25min, sendo este um valor que não torna a análise demasiado exaustiva.

3.2.2 Máquina de Injeção

A máquina de injeção utilizada nesta simulação é a mesma utilizada durante o processo de produção da peça tornando a análise mais realista. A modelo da máquina de injeção é Victor Vs100 cujas especificações podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações da Máquina de Injeção "Victor Vs100"

	<i>Propriedades</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Unidade de Injeção	Curso máximo	145	[mm]
	Taxa de Injeção	21,39	[cm ³ /s]
	Diâmetro do Fuso	36	[mm]
Unidade Hidráulica	Pressão Máxima	1928	[bar]
	Relação de Intensificação	12,30	-
	Tempo de Resposta	0,20	[s]
Unidade de Fecho	Força Fecho	100	[ton]

3.2.3 Modelação dos Sistemas funcionais do molde

Sistema de Injeção

De forma a tornar a simulação mais aproximada à realidade foi necessário dimensionar devidamente o sistema de injeção a ser adotado. Tendo em conta as especificações da peça do caso de estudo, adotou-se um sistema de injeção de canais quentes, mais especificamente um bico quente para ataque direto. Esta tipologia apresenta algumas vantagens face aos canais frios, entre as quais se destacam um menor consumo de material, tempos de ciclo inferiores e facilidade de automatização do processo dada a ausência de jito. A Figura 23 representa o modelo de simulação numérica com o respetivo sistema de injeção incorporado.

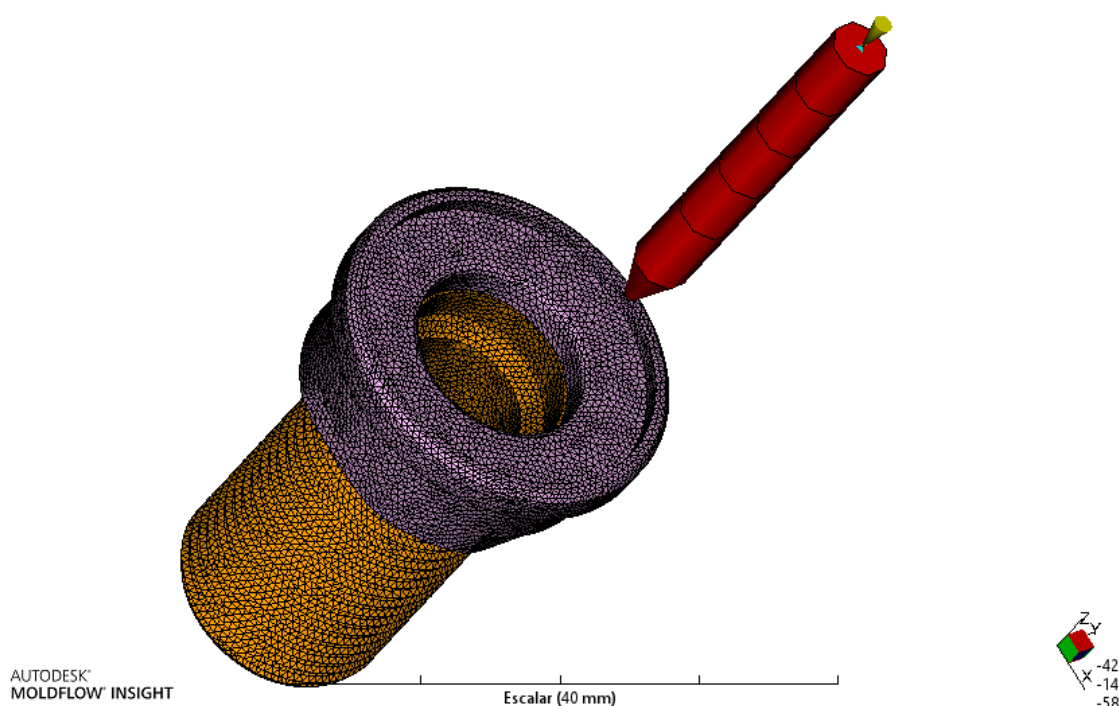


Figura 23 - Modelo de Simulação Numérica e respetivo Sistema de Injeção

Tendo em conta a localização do ponto da camada de plástico onde o polímero é injetado, considerou-se pertinente a utilização de um ataque com formato cónico em que o diâmetro inferior seria 1mm, aproximadamente a espessura do local onde o plástico é injetado. Tomando esse valor como referência, recorreu-se a um catálogo

específico para bicos quentes da HASCO® [29] no qual se verificou que o diâmetro mínimo a utilizar para o alimentador deveria ser 4,5 mm, respeitando as características pretendidas. A Figura 24 representa um esquema simples da geometria do sistema de alimentação.

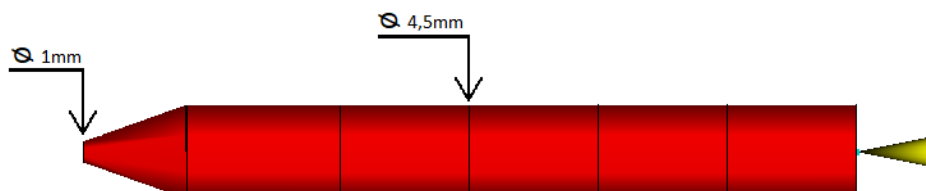


Figura 24 - Representação esquemática do sistema de alimentação

Sistema de controlo de temperatura (SCT)

O sistema de controlo de temperatura não foi modelado para este caso de estudo em particular. As temperaturas adotadas na simulação referência, nomeadamente, a temperatura do fundido e a temperatura de superfície do molde, constituem parâmetros do processo que já se encontram dentro de intervalos ideais de processamento para o termoplástico em questão. O facto de se ter considerado apenas uma cavidade moldante, à qual foi atribuída uma temperatura uniforme na execução das simulações, faz com que a modelação do SCT não seja determinante para o estudo em questão e não afete diretamente os resultados que se pretendem obter.

3.3 Estudo Numérico

Tomando em consideração o objetivo desta dissertação relativamente ao caso de estudo, foi considerado pertinente estudar o comportamento da peça a um nível mais concreto. Para isso foram seleccionados 12 nós que estão localizados no plano $X=0$ correspondente não só à formação da maior parte da linha de soldadura (Figura 25), sendo esta considerada a zona onde a peça é mais frágil e mais susceptível à rutura, mas

também ao corte transversal do lado da injeção. Os nós selecionados estão devidamente identificados na Figura 26.

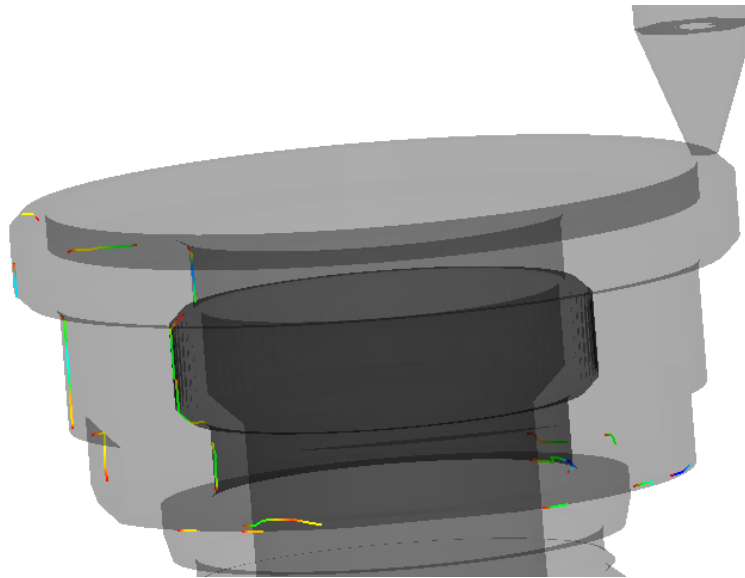


Figura 25 - Representação das Linhas de Soldadura

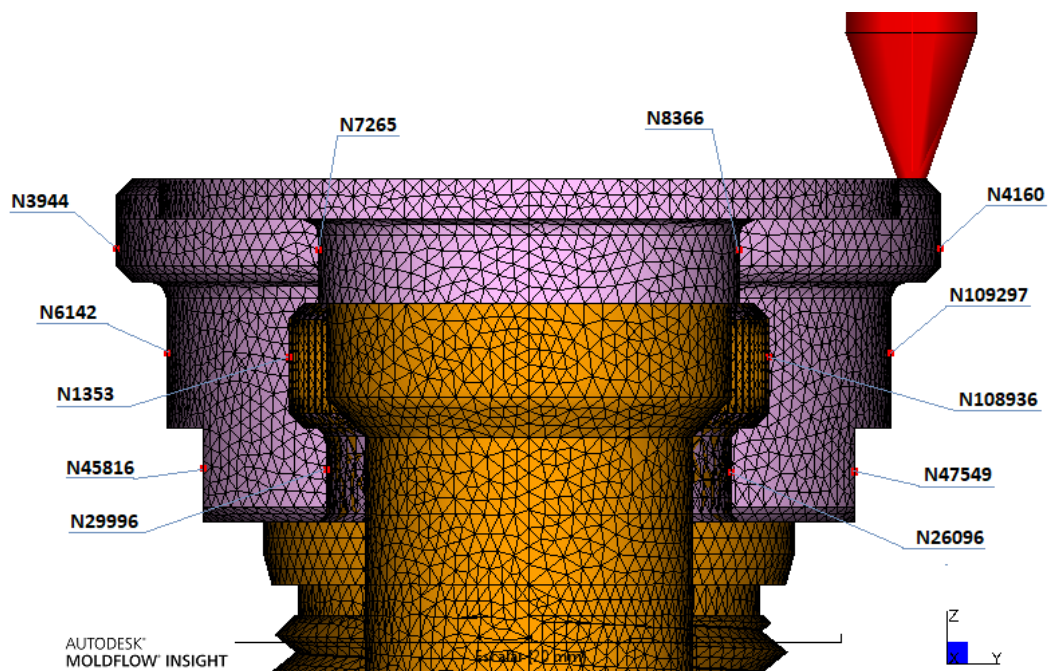


Figura 26 - Identificação dos Nós Selecionados

Pretendeu-se estudar o comportamento da peça em 3 zonas distintas da secção transversal designadas adiante por “camadas”: uma primeira camada constituída pelos

nós N45816, N29996, N26096 e N47549 que se encontra em contacto com o inserto em duas faces distintas; uma segunda camada constituída pelos nós N6142, N1353, N108936 e N109297 que tem uma face de contacto com o inserto; uma terceira camada constituída pelos nós N3944, N7265, N8366 e N4160 que não se encontram em contacto direto com nenhuma das faces do inserto. Para que melhor se compreenda como se pretendeu levar a cabo este estudo, pode-se verificar na Figura 27 as diferentes camadas da peça consideradas, onde o lado A corresponde à localização da maior parte da linha de soldadura e o lado B corresponde ao lado da injeção.

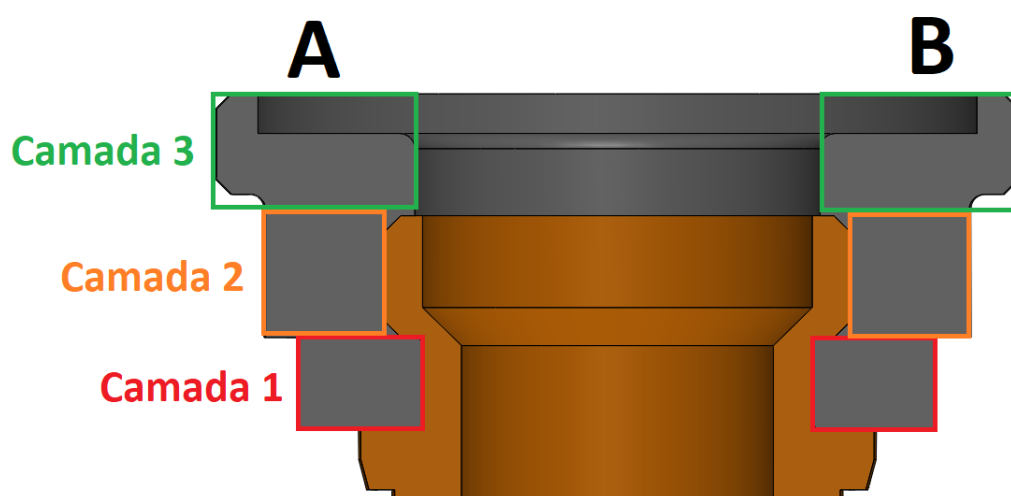


Figura 27 - Identificação das Camadas

A seleção dos nós em estudo teve como objetivo estudar qual o comportamento dimensional da peça após o seu processamento, verificando se esta cumpriria os requisitos dimensionais e respetivos toleranciamentos exigidos para a sua função. Houve a necessidade de estudar as dimensões a três níveis diferentes correspondentes às três camadas identificadas anteriormente, devido às questões de *design* da peça sobre-moldada. Este estudo tem duas finalidades: a primeira comparar se as deflexões e respetivos empenos criados nas diferentes camadas influenciam as dimensões projetadas inicialmente e em segundo comparar as posições diametralmente opostas, no caso o lado da linha de soldadura e o lado do ponto de injeção. Isto tem como objetivo verificar se as deflexões e contrações que surgem do processo de moldação da peça causam o mesmo nível de empeno na camada de polímero tanto na zona da linha de soldadura como na zona do ponto de injeção.

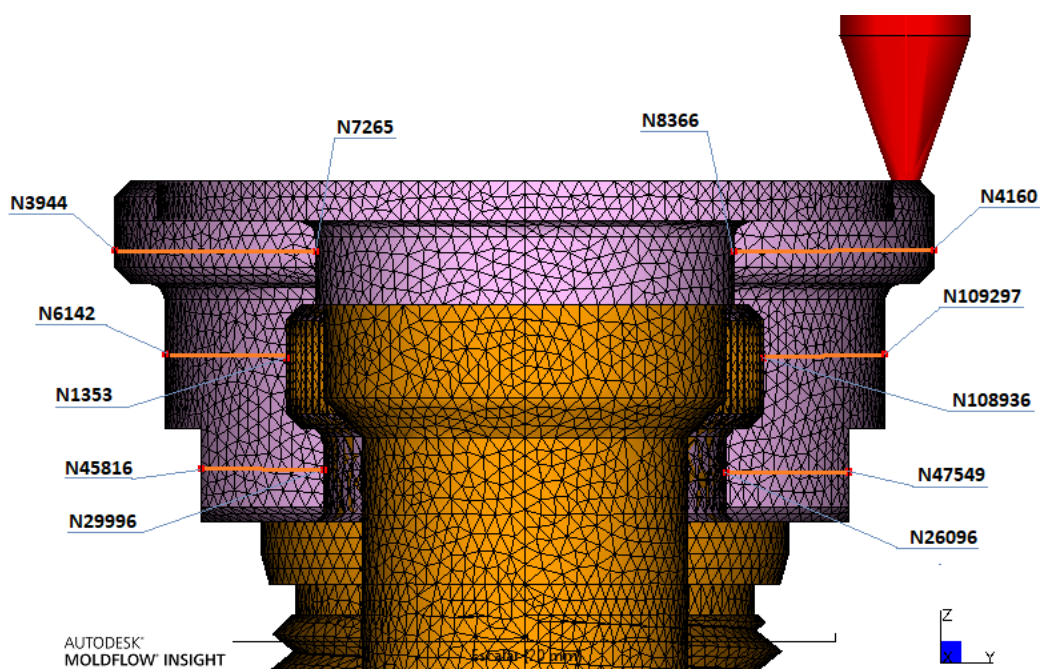


Figura 28 - Dimensões das Camadas em Estudo

Sendo que o objetivo é verificar de que forma são afetadas as dimensões criadas pelos nós (Figura 28), pretendeu-se selecionar em cada um dos lados um nó mais interior correspondendo à interface polímero/metal nas camadas 1 e 2, pelo facto destes funcionarem como pontos praticamente fixos. Apesar do inserto também sofrer deflexão, esta é quase insignificante em relação à camada de plástico. Na camada 3 seleccionou-se o nó interior da camada de plástico. Relativamente aos nós representados nas faces exteriores da camada de plástico, será o deslocamento destes que irá permitir verificar se existem diferenças antes e após a contração causada pelo processo de moldação por injeção. A partir destes nós será possível verificar qual a variação dimensional das camadas e qual a percentagem de contração a que estas estarão sujeitas.

3.3.1 Estudo de Referência

Como ponto de partida decidiu-se fazer uma simulação que englobasse enchimento, compactação e empenos que fosse a referência para o estudo levado a cabo no AMI®. Dentro desse resultado de referência foi necessário proceder-se à escolha de quais parâmetros e condições de processamento que melhor se adequariam ao caso de

estudo e aos materiais em questão. O material em estudo é um termoplástico semicristalino, o POM, que possui características específicas do seu fabricante, existindo algumas condições de processamento ideais para o material. A temperatura do fundido, a temperatura da superfície do molde e a temperatura de extração são as condições de processamento que já vêm referenciadas pelo fabricante e que podem ser vistas na Tabela 2.

Partindo deste pressuposto, definiram-se quais as condições de processamento que iriam ser tomadas como referência no AMI® para se proceder a um estudo de enchimento, compactação e empeno. As condições de processamento tomadas como referência estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições de processamento de Referência

Condições de Processamento	Valor	Unidade
Temperatura do Fundido	190	[°C]
Temperatura de superfície do Molde	90	[°C]
Tempo de enchimento	0,9	[s]
Pressão de compactação	15,5	[MPa]
Tempo de compactação	17	[s]
Temperatura de extração	131	[°C]
Percentagem mínima de peça solidificada à temperatura de extração	90	[%]

Como já indicado anteriormente, a temperatura do fundido, temperatura da superfície do molde e a temperatura a que a peça deve ser extraída são condições de processamento que já vêm parametrizadas pelo fabricante, as quais já foram testadas em vários ambientes e sujeitos a diversos testes termomecânicos.

As restantes condições de processamento já não estão diretamente relacionadas com o material polimérico em questão, mas sim com a peça em estudo em termos dimensionais e de requisitos da mesma. O controlo do enchimento nesta simulação de referência foi realizado através do tempo de enchimento obtido com base em algumas simulações prévias em que todos os parâmetros necessários à execução da simulação em AMI® foram tomados por defeito. Os resultados do tempo de enchimento obtidos por essas simulações rondaram sempre 0,9 segundos, sendo que se tomou esse valor como referência.

O controlo da compactação foi feito através da pressão de compactação em função do tempo de compactação. Nessas mesmas simulações prévias foi possível verificar através de um resultado do gráfico da pressão ao longo do tempo, qual a pressão de compactação. O gráfico pode ser visto na Figura 29.

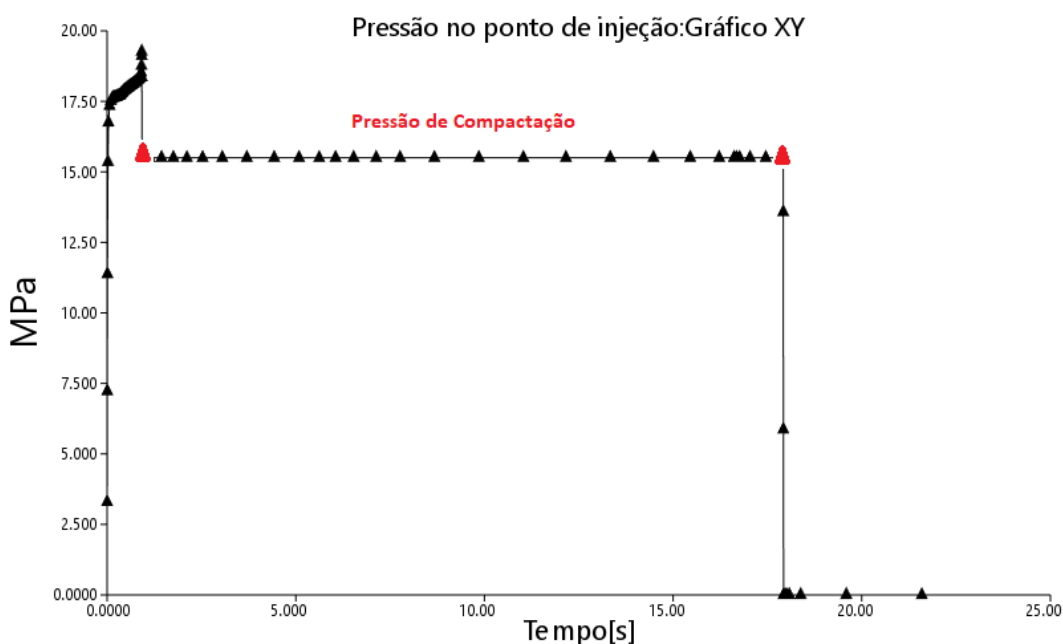


Figura 29 - Gráfico da Pressão no ponto de Injeção

Relativamente ao tempo de compactação, o valor que foi tomado como referência teve por base a temperatura da peça ao longo do seu enchimento, onde foi escolhido o tempo no qual a maior parte da peça já se encontra à temperatura de extração. A esse

tempo retiram-se os 0,9s do tempo de injeção e obtem-se os 17s referentes ao tempo de compactação indicado. Na Figura 30 está representada a camada de plástico que se encontra acima da temperatura de extração (131°C), exatamente no momento em que a pressão de compactação deixa de ser exercida (17,92s). Tal como referido acima, a maior parte do polímero já se encontra abaixo da temperatura de extração, sendo esse o facto que justifica se terem estabelecido os 17s como o tempo de compactação.

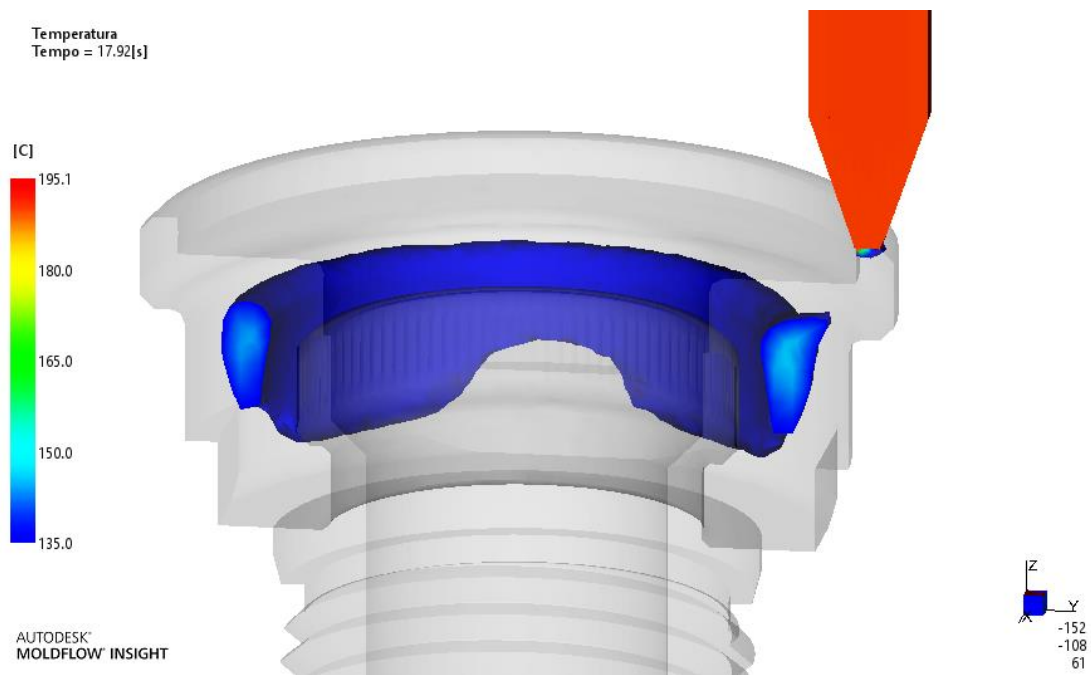


Figura 30 - Distribuição da Temperatura na Peça para o tempo de 17,92s

A percentagem mínima de peça solidificada à temperatura de extração seleccionada foi 90%, sendo esse valor de percentagem normalmente utilizado para várias simulações, nomeadamente em casos reais da indústria que implica uma produção a larga escala e ao cumprimento de prazos de entrega a clientes. Estes fatores levam a que as peças durante o processo de enchimento e compactação não seja solidificada totalmente.

3.4 DOE: otimização do processo de moldação

O *Design of Experiments* (DOE) é uma ferramenta estatística que permite verificar qual o efeito de um determinado parâmetro ou variável do processo na qualidade final

da peça em estudo. É também considerado um método de engenharia que determina qual desses parâmetros tem maior impacto no indicador de qualidade através de uma série de simulações, nas quais se variam os parâmetros de processamento selecionados e, posteriormente, se calculam os resultados baseados nos critérios de qualidade estabelecidos [27].

O DOE é uma ferramenta bastante útil para a engenharia na medida em que apresenta várias vantagens, entre as quais se podem considerar:

- obtenção de um grande volume de informação para além da solução, contrariamente ao que acontece com o método tentativa-erro;
- menor tempo dispendido para se obter uma solução credível;
- melhor qualidade de peças pelo facto de ser uma ferramenta que pode levar a soluções nunca pensadas pelos próprios engenheiros;
- ajuda no aumento do conhecimento por ser possível relacionar parâmetros físicos de entrada em soluções viáveis, de uma forma bastante intuitiva.

3.4.1 DOE presente no AMI®

Quando se estabelece uma análise DOE a partir do AMI® é necessário definir um ou vários critérios de qualidade que vão influenciar toda a simulação. Existem quatro tipos de desenho de experiências possíveis de serem executadas no AMI®, entre as quais se encontram:

- a análise paramétrica onde se pode analisar o efeito de uma variável isoladamente nos indicadores de qualidade definidos;
- a análise da influência das variáveis por recurso ao método de Taguchi, que fornece informações sobre a influência das variáveis nos resultados da análise, listando, no registo de cada critério de qualidade, a influência percentual da cada variável;
- a análise da resposta das variáveis que utiliza a estrutura cúbica de face centrada e fornece informações sobre o comportamento dos critérios de qualidade nos intervalos de variáveis especificados. As respostas obtidas sob a forma gráfica

permitem estabelecer a combinação de parâmetros ótima para atingir os critérios de qualidade selecionados;

- a experiência híbrida criada através da junção das duas anteriores, onde numa só experiência se obtêm a influência das variáveis e, por conseguinte, a resposta das variáveis [27].

3.5 Pré-aquecimento dos insertos

De acordo com a revisão bibliográfica o aquecimento dos insertos pode trazer algumas vantagens em termos da diminuição das contrações que possam surgir no processamento de peças sobre-moldadas, na medida em que o aumento da temperatura destes faz com que os valores do coeficiente de expansão térmica do metal aumentem e se aproximem dos valores característicos dos polímeros. Isto terá como consequência um aproximar do comportamento em termos de contração dos materiais, causando também uma diminuição das tensões residuais acumuladas aquando do seu processamento, aumentando as probabilidades de se obterem peças sobre-moldadas com maior qualidade e com menos probabilidade de fratura. Na sobre-moldação por insertos, um dos parâmetros considerados mais críticos para a qualidade final é a temperatura do inserto, sendo que se proceder ao pré-aquecimento dos insertos metálicos provoca uma minimização da contração na pós-moldação, expande o inserto metálico e aumenta a força e a qualidade da linha de soldadura [30]. Neste estudo foram pré-aquecidos os insertos até 50°C, 100°C e 120°C.

3.6 Análise estrutural: importação do histórico de processamento

Após a simulação numérica da moldação da peça por injeção e análise do seu processamento, pretendeu-se continuar o estudo analisando estruturalmente o comportamento da peça. Sendo um dos objetivos deste estudo a análise do comportamento da peça em serviço, recorreu-se ao *ANSYS 2019®* para analisar quais as tensões acumuladas devido ao seu processamento. Depois de uma pesquisa exaustiva acerca de análises estruturais de peças plásticas, concretamente de peças sobre-moldadas em insertos metálicos, constatou-se uma falta de bibliografia específica na

qual se abordassem as análises estruturais importando o histórico de processamento das peças aquando da moldação por injeção. Na tentativa de colmatar essa lacuna e como se pretende que a análise se aproxime o mais possível de um cenário real, houve a necessidade de se aplicar uma metodologia na qual se importasse esse histórico de processamento e não apenas analisar o comportamento da peça importando-a diretamente do ficheiro CAD da mesma. Esta metodologia pode-se tornar uma mais-valia em relação às existentes, promovendo a evolução do estudo das peças sobre-moldadas com insertos metálicos e a sua otimização.

A metodologia aplicada daqui em diante contempla a utilização de um *software* da Autodesk, o *Helius PFA 2019*®, que neste estudo tem como função o mapeamento das tensões e deformações geradas durante a simulação do processamento da peça no AMI® para um ficheiro capaz de ser importado para o *ANSYS 2019*®.

Depois de se proceder ao mapeamento dos resultados, procede-se à importação do ficheiro para o *ANSYS*, iniciando-se a análise estrutural da peça. A análise realizada neste *software* é do tipo estrutural estática, portanto, é exercida uma força de uma certa magnitude, sendo-lhe imposto um determinado deslocamento durante apenas um ciclo. Antes de se executar a simulação estrutural, o procedimento implica a discretização do domínio de cálculo (peça) em malha de elementos finitos. Para uniformizar a análise e prevenir eventuais disparidades relativamente aos resultados, utilizou-se uma malha em que o tamanho do lado do elemento é de 0,6 mm (Figura 31), precisamente o mesmo utilizado na análise do processo de moldação por injeção da peça em AMI®. Como já referido na análise de independência da malha, o elemento designa-se por SOLID 45 no contexto do *ANSYS*, caracterizado por ser um elemento tetraédrico de 4 nós (Figura 22).

A análise estrutural de elementos finitos envolve a simulação do comportamento mecânico do polímero em estudo. Considerando análises realizadas por outros autores (secção 3.1.5) e o comportamento mecânico elástico-plástico do POM, o facto de existir uma grande complexidade na simulação do regime plástico do material, leva a que seja adotado, neste estudo, um comportamento linear elástico para a análise em *ANSYS Static Structural*, a qual se caracterizou através de parâmetros como o módulo de Young, coeficiente de Poisson e a tensão de cedência do POM.

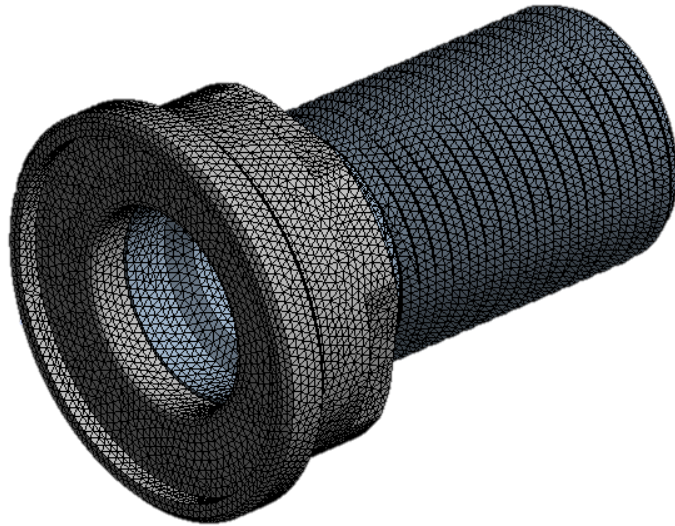


Figura 31 - Malha em ANSYS

Antes do mapeamento dos resultados, é necessário proceder ao pré-processamento do modelo atribuindo-lhe parâmetros de análise. No que diz respeito aos parâmetros utilizados durante o pré-processamento, considerou-se um deslocamento nulo aplicado na base da peça, especificamente na base do inserto de latão, tal como representado na Figura 32.

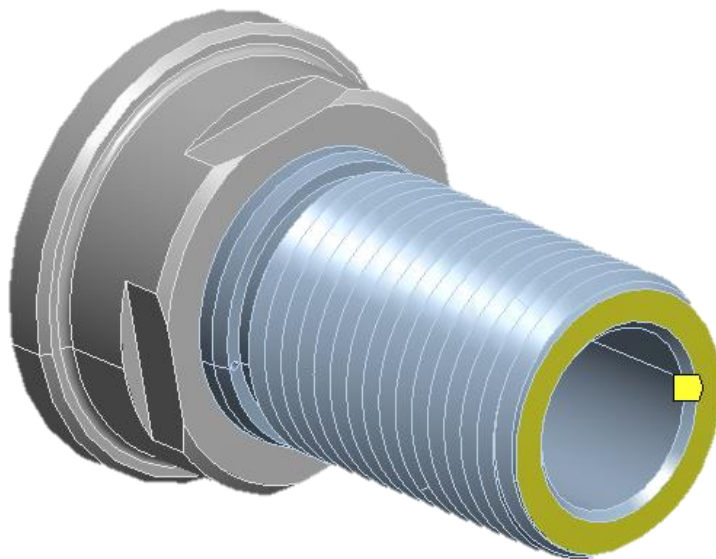


Figura 32 - Deslocamento aplicado na simulação estrutural

A aplicação deste deslocamento nulo significa que a peça terá um constrangimento quanto ao seu deslocamento em todas as direções, constituindo uma base de fixação para a análise estrutural estática.

Devido às características da peça em questão e à função para ela preconizada, optou-se por estabelecer como parâmetro de pré-processamento uma pressão ao longo de todo o interior da peça com o intuito de simular a passagem de água no interior do casquilho. Uma vez que se exige o estabelecimento de algumas condições de fronteira para uma análise em *ANSYS Static Structural*, é necessário aplicar uma determinada força para que seja possível a análise ser executada. Considerando que o objetivo desta análise consiste em verificar a magnitude das tensões residuais geradas no processamento, optou-se por aplicar uma pressão nominal de 1Pa. Esta pressão é praticamente irrelevante e não terá qualquer influência direta sobre os resultados importados do AMI®, tendo em conta que o software apenas permite a obtenção de tensões equivalentes à força exercida e que, neste caso, correspondem às tensões residuais acumuladas na parte plástica da peça. Esta primeira análise serve apenas o propósito de se comprovar a existência de tensões residuais, sendo que não tem representatividade do ponto de vista de engenharia.

O próximo passo contempla o teste de funcionalidade da peça efetuado na OLI – Sistemas Sanitários, o teste de variação de pressões, no qual a pressão máxima a que a tubagem é sujeita é 30 bar (3MPa). A simulação da pressão máxima na tubagem tem como objetivo garantir o cumprimento das normas de funcionamento desta peça. Esta análise é em tudo semelhante à anterior, sendo que apenas se altera a pressão exercida no interior do casquilho.

As tensões residuais representam uma das grandes causas dos defeitos causados nas peças sobre-moldadas em insertos metálicos e que no caso do casquilho em estudo podem contribuir para o surgimento das fraturas analisadas na secção 3.1. Na Figura 33 está representada uma vista de corte da peça em estudo, na qual a vermelho se podem verificar as zonas sujeitas à pressão nominal e, posteriormente, à pressão do teste de funcionalidade.

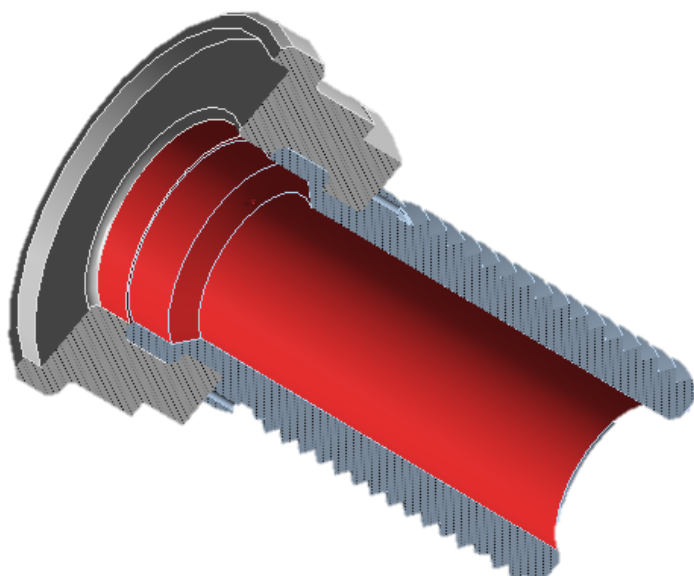


Figura 33 - Pressão aplicada na simulação estrutural

3.6.1 Simulações comparativas

Depois de estabelecidos os parâmetros da análise estrutural estática foi delineado um conjunto de análises necessárias para a verificação da tese alegada neste trabalho. A primeira simulação baseia-se numa abordagem típica que contempla o uso das condições de fronteira e cargas mencionadas no capítulo anterior. Primeiro, o ficheiro CAD da peça é importado diretamente para o ANSYS, sem considerar o histórico termo-mecânico de processamento da mesma. Esta análise tem como objetivo simular o comportamento estrutural da peça em condições ideais. A fase seguinte consiste no mapeamento, através do *Helius PFA 2019*[®], das tensões e deformações obtidas durante a simulação de referência efetuada no AMI[®] para o modelo criado em ANSYS. A análise efetuada com o modelo mapeado permite analisar estruturalmente a peça de uma forma mais realista, tendo em consideração que a peça não constitui um sistema perfeito depois de sofrer o processo de moldação por injeção, pelo facto de considerar para o cálculo das tensões e deformações o histórico de processamento da moldação por injeção. Posteriormente a comparação dos resultados das tensões e deformações poderá demonstrar que, de facto, considerar o histórico de processamento da peça numa análise estrutural de uma peça plástica sobre-moldada tem um impacto no seu

comportamento aquando em serviço e poderá ter de ser levado em consideração na fase de desenvolvimento do produto. Num produto onde se exploram os limites do *design* da peça sobre-moldada, a diferença em acautelar a existência de tensões residuais numa simulação numérica da previsão do seu comportamento em serviço pode evitar a falha de operabilidade do sistema.

A metodologia descrita para o teste de funcionalidade da peça foi aplicada para a combinação de parâmetros otimizada obtida pelo módulo do DOE e também para a simulação na qual se aquece o inserto até 100°C. Desta forma, foi possível comparar a magnitude das tensões acumuladas durante o processo de moldação da peça e poder-se verificar se o pré-aquecimento da peça pode constituir uma medida a aplicar tendo em vista a redução da acumulação de tensões.

De forma a que se entenda melhor a metodologia aplicada durante este estudo, apresenta-se na Figura 34 um diagrama esquemático da mesma.

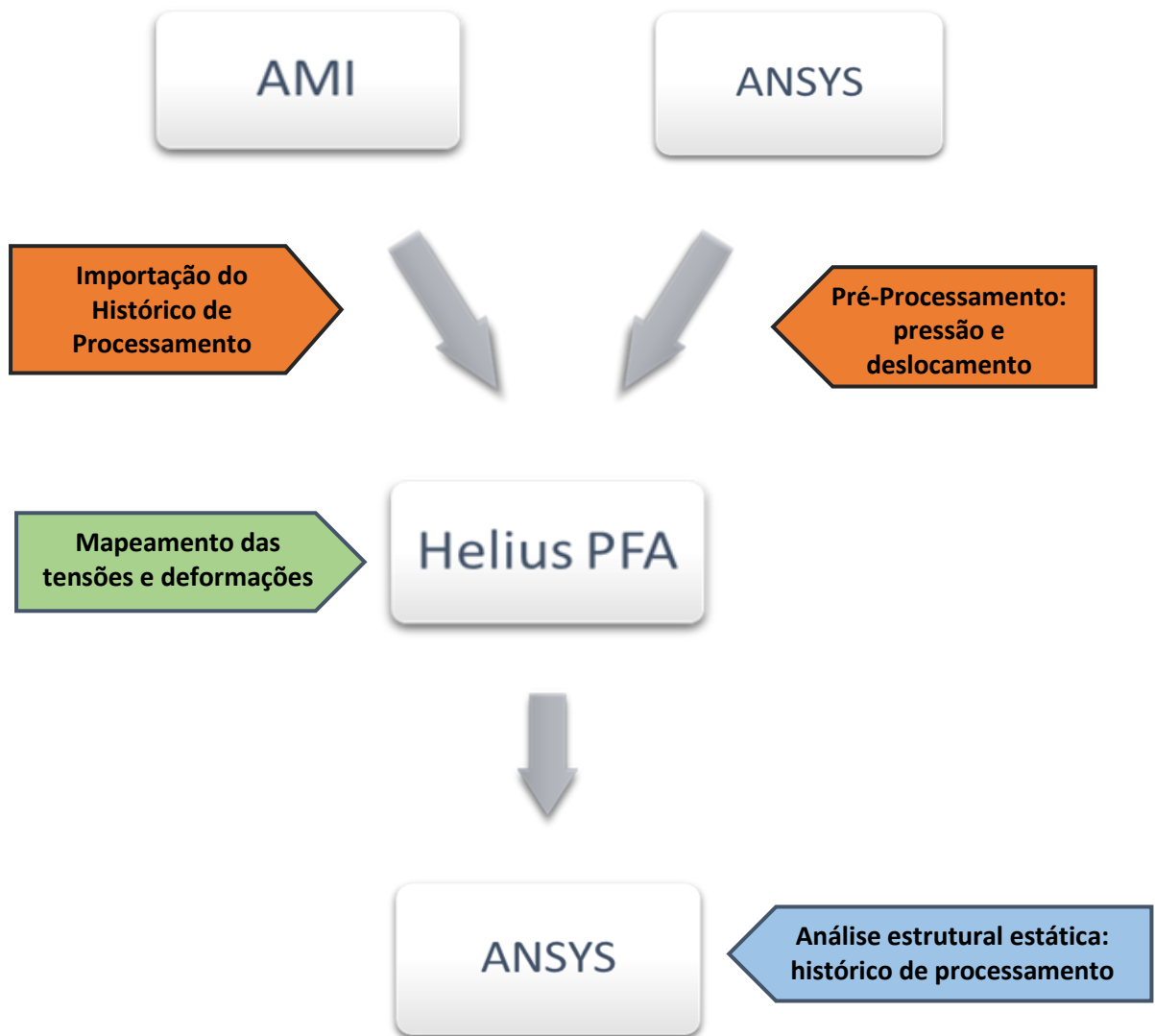


Figura 34 - Esquema da Metodologia aplicada

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos com base na metodologia explicada no capítulo anterior. Optou-se por um estudo numérico baseado nas camadas de peça e que contemplou os resultados de deflexão que se revelaram nas dimensões dessas mesmas camadas, antes e após a fase de compactação (variações dimensionais), que são originados pelas contrações diferenciais também abordadas.

Em primeiro lugar apresentam-se os resultados do DOE aplicados ao caso de estudo para que, posteriormente, seja mais fácil visualizar as comparações entre os parâmetros de referência e os parâmetros otimizados pelo módulo do DOE.

O ponto de partida da análise engloba um conjunto de resultados obtidos para uma simulação de referência, servindo esta como o principal ponto de comparação. Posteriormente, compararam-se com os resultados obtidos para a simulação numérica correspondente à otimização dos parâmetros de processamento e, de seguida, com os resultados do aquecimento dos insertos.

Numa segunda fase, são verificadas as tensões resultantes da análise estrutural executada no *ANSYS*, partindo também de uma simulação estrutural que corresponde a uma análise direta da modelação da peça sem quaisquer dados referentes ao seu processamento. Numa fase posterior foi incluído o histórico de processamento com o intuito de se verificar o agravamento da magnitude das tensões acumuladas na parte plástica. Posteriormente, procedeu-se à simulação de um teste de funcionalidade da peça aquando em serviço e, por último, executou-se uma simulação com um inserto pré-aquecido, também em serviço.

4.1 DOE aplicado ao caso de estudo

No que diz respeito ao caso de estudo foram utilizadas duas experiências DOE presentes no AMI®, nomeadamente a influência das variáveis e a resposta das variáveis. Partindo das condições de processamento apresentadas na simulação referência, optou-se por escolher 5 dessas condições de processamento como variáveis de estudo na realização da experiência da influência das variáveis. As variáveis selecionadas para

o estudo foram a temperatura do fundido, a temperatura de superfície do molde, o tempo de enchimento, a pressão de compactação e a percentagem mínima de peça solidificada à temperatura de extração.

4.1.1 Experiência da influência das variáveis

Numa primeira etapa foi efetuada uma experiência da influência das variáveis, tendo como critério de qualidade o empeno da peça, mais concretamente a deflexão total e nas suas várias direções. Nesta experiência era necessário variar as condições de processamento dentro de um intervalo cujos valores mínimo, médio e máximo estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Intervalos das Condições de Processamento

Condição de Processamento	Intervalos da Experiência		
	Valor Mínimo	Valor Médio (Referência)	Valor Máximo
Temperatura do fundido (°C)	170	190	210
Temperatura da Superfície do Molde (°C)	70	90	110
Tempo de Enchimento (s)	0,80	0,90	1,10
Pressão de compactação (MPa)	12,40	15,50	18,60
Percentagem mínima de peça solidificada (%)	80	90	100

Após a definição dos intervalos de variação das condições de processamento e estando definidas a deflexão total e a deflexão nas direções X, Y e Z como critério de qualidade, executou-se a experiência produzindo os resultados presentes na Tabela 7.

Tabela 7 - Percentagem de Influência das Variáveis

Condição de Processamento	Percentagem de Influência (%)			
	Deflexão Total	Deflexão Componente X	Deflexão Componente Y	Deflexão Componente Z
Temperatura do fundido	35,19	34,21	34,99	33,74
Temperatura da Superfície do Molde	14,72	17,19	15,13	15,05
Tempo de Enchimento	4,20	3,54	4,65	4,75
Pressão de compactação	40,11	39,81	39,37	41,00
Percentagem mínima de peça solidificada	5,78	5,24	5,85	5,46

Com base nos resultados de influência das variáveis é possível verificar que tanto o tempo de enchimento como a percentagem mínima da peça solidificada apresentam percentagens de influência na deflexão bastante baixas (na ordem dos 4% a 5%), comparativamente com as restantes condições de processamento. Devido às dimensões reduzidas da peça, seria expectável que o tempo de enchimento e a percentagem mínima de peça solidificada tivessem uma influência menos significativa, sendo as temperaturas e pressões do processo os fatores que terão maior influência.

4.1.2 DOE da resposta das variáveis

Pelas razões mencionadas anteriormente, a execução da experiência DOE da resposta das variáveis contempla apenas as 3 variáveis de maior influência na deflexão total e deflexão nas várias direções. As três condições de processamento que foram adotadas nesta experiência foram a temperatura do fundido, a temperatura de superfície do molde e a pressão de compactação. Os intervalos de variação destes parâmetros são os mesmos utilizados na experiência da influência das variáveis (Tabela 6), tendo como finalidade encontrar a melhor combinação de condições de

processamento que otimizam os valores da deflexão. A Tabela 8 apresenta as várias combinações ordenadas de forma crescente de valores de deflexão.

Tabela 8 - Tabela da Resposta das Variáveis

Número do Estudo	Temperatura de Superfície do Molde (°C)	Temperatura do Fundido (°C)	Pressão de Compactação (MPa)	Deflexão Total [Desvio padrão] (mm)	Deflexão Componente X [Desvio padrão] (mm)	Deflexão Componente Y [Desvio padrão] (mm)	Deflexão Componente Z [Desvio padrão] (mm)
4	70	210	18,60	0,0159	0,0189	0,0165	0,0169
3	70	210	12,40	0,0165	0,0196	0,0171	0,0175
14	90	190	18,60	0,0171	0,0204	0,018	0,0185
15	90	190	15,50	0,0174	0,0207	0,0183	0,0189
12	90	210	15,50	0,0175	0,0207	0,0186	0,0196
13	90	190	12,40	0,0177	0,0211	0,0186	0,019
9	70	190	15,50	0,0185	0,0217	0,0198	0,0214
10	110	190	15,50	0,0188	0,0223	0,02	0,0207
6	110	170	18,60	0,0198	0,0235	0,0211	0,0221
8	110	210	18,60	0,0198	0,0235	0,0212	0,0221
7	110	210	12,40	0,0201	0,024	0,0215	0,0222
5	110	170	12,40	0,0202	0,024	0,0215	0,0223
2	70	170	18,60	0,0208	0,0244	0,0223	0,0246
11	90	170	15,50	0,0211	0,0248	0,0226	0,0244
1	70	170	12,40	0,0215	0,0252	0,023	0,0254

De acordo com os resultados produzidos na experiência da resposta das variáveis, existem três combinações que otimizam o critério de qualidade, ou seja, diminuem a deflexão total e nas suas três direções principais. Estão listadas na Tabela 9, os resultados do DOE que apresentam a combinação das condições de processamento correspondentes aos mínimos valores de deflexão do subcomponente plástico.

Tabela 9 - Condições de processamento Otimizadas pelo DOE

Condições de Processamento	Valor	Unidade
Temperatura do Fundido	210	[°C]
Temperatura de superfície do Molde	70	[°C]
Tempo de enchimento	0,9	[s]
Pressão de compactação	18,6	[MPa]
Tempo de compactação	17	[s]
Temperatura de extração	131	[°C]
Porcentagem mínima de peça solidificada à temperatura de extração	90	[%]

4.2 Deflexões e Empenos

A partir dos pressupostos delineados na metodologia no qual se pretendia estudar o comportamento da peça sobre-moldada a um nível mais concreto, foram estudadas as dimensões das três camadas da parte plástica da peça para a simulação numérica de referência e também para a simulação numérica otimizada através da ferramenta DOE. Nas Figuras 35 e 36 pode-se encontrar uma visão geral da magnitude das deflexões totais geradas na peça após o processo de moldação por injeção, amplificada dez vezes, respetivamente para a simulação referência e para a simulação otimizada.

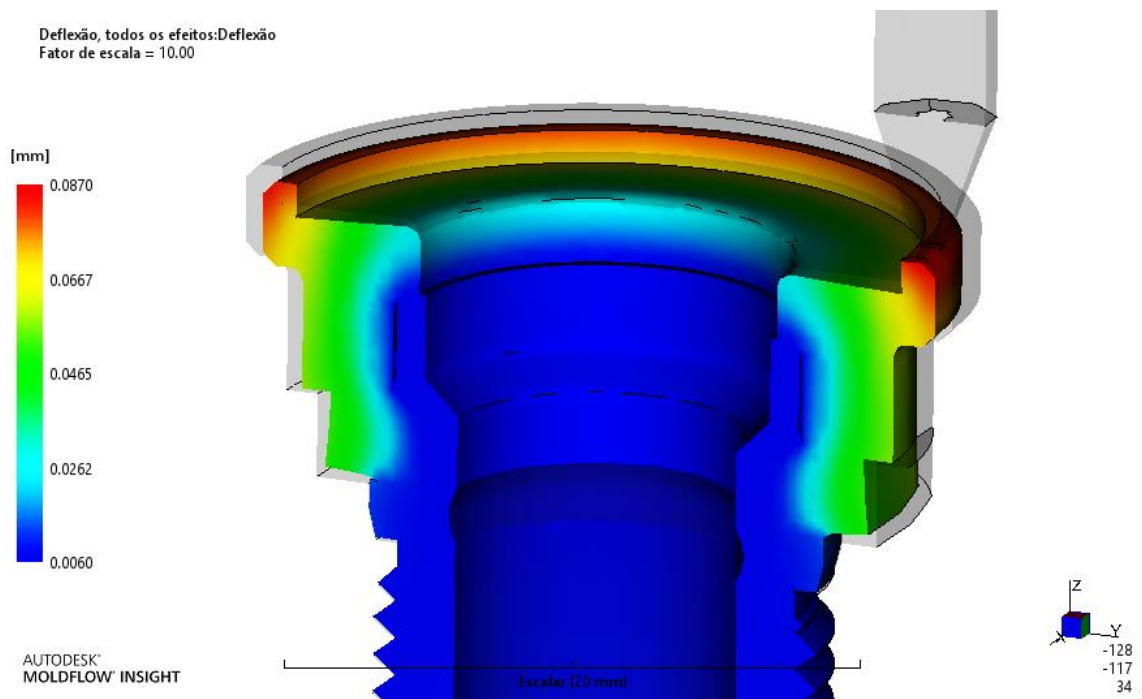


Figura 35 - Deflexões da Simulação Referência (corte transversal Y-Z)

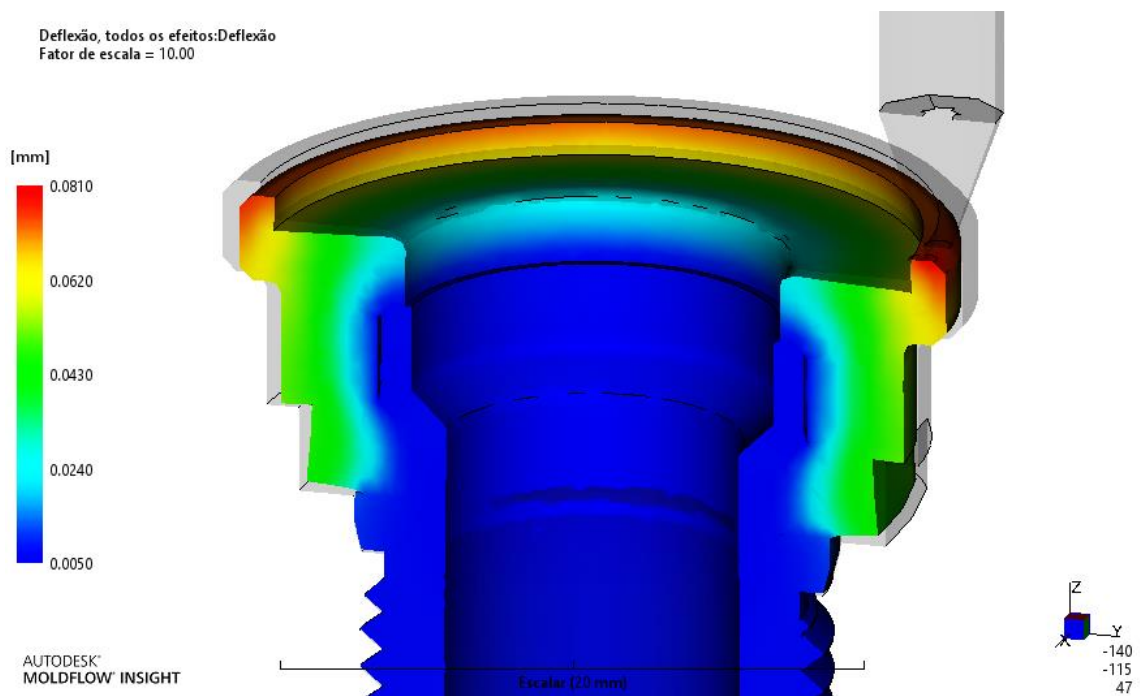


Figura 36 - Deflexões na Simulação Otimizada (corte transversal Y-Z)

Numa primeira apreciação da distribuição das deflexões ao longo de toda a peça, mais concretamente na parte plástica, pode-se observar uma diminuição das deflexões globais da peça, tendo em conta que a distribuição destas é muito semelhante nas duas simulações. Em ambas as simulações, denota-se uma maior deflexão à medida que as zonas da camada de plástico são mais afastadas do inserto metálico, o que revela que durante o processo de sobre-moldação, os insertos causam efetivamente um constrangimento à contração do subcomponente plástico da peça. Os resultados do DOE indicam que a otimização de alguns parâmetros de processamento resulta em diminuição das deflexões, sendo que neste caso particular procedeu-se à alteração da temperatura do fundido, da temperatura da superfície do molde e da pressão de compactação. A partir dos resultados obtidos com estas duas simulações, pode-se constatar que o aumento da temperatura do fundido de 190°C para 210°C e da pressão de compactação de 15,5MPa para 18,6MPa, bem como a diminuição da temperatura da superfície do molde de 90°C para 70°C resultam na diminuição das deflexões e empenos no subcomponente plástico.

4.3 Variações Dimensionais

Depois de uma apreciação geral das deflexões obtidas com o auxílio das simulações numéricas de referência e otimizada, apresentam-se agora os resultados das dimensões observadas nas camadas identificadas no capítulo anterior (Figura 27) antes e depois do subcomponente plástico contrair, constituindo as variações dimensionais. Os valores registados correspondem tanto ao lado da formação de grande parte da linha de soldadura (A) como ao lado do ponto de injeção (B). O lado A corresponde também à zona onde esta peça tem um histórico de fratura e pode ser considerada uma zona crítica.

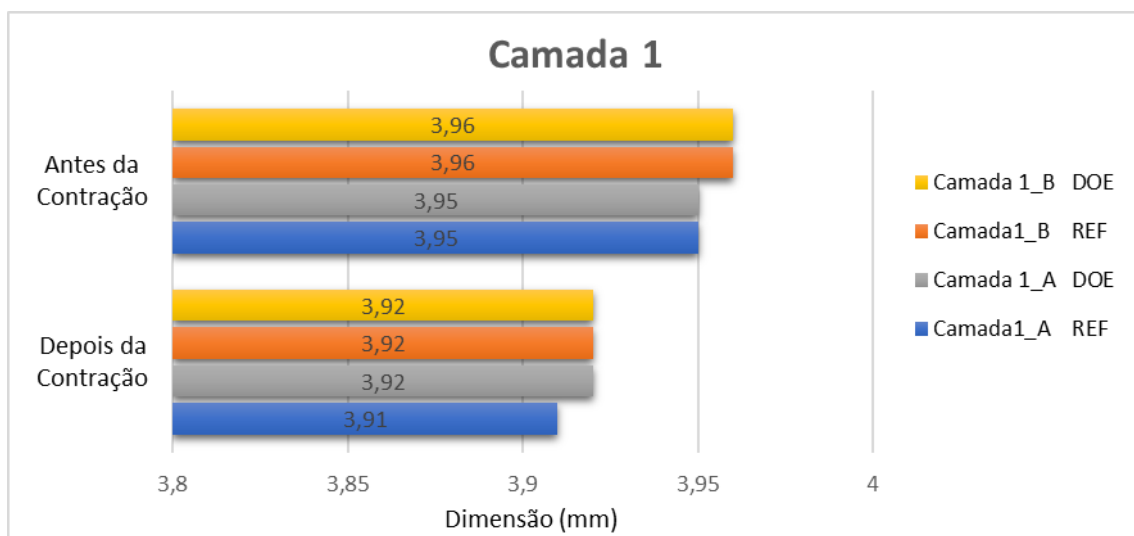


Figura 37 - Gráfico das variações dimensionais da Camada 1

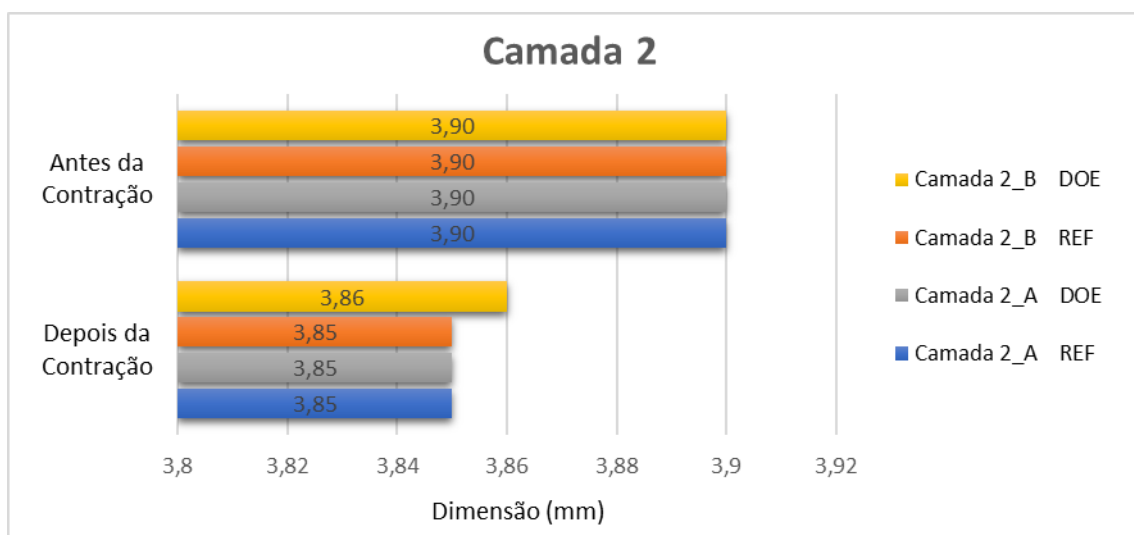


Figura 38 - Gráfico das variações dimensionais da Camada 2

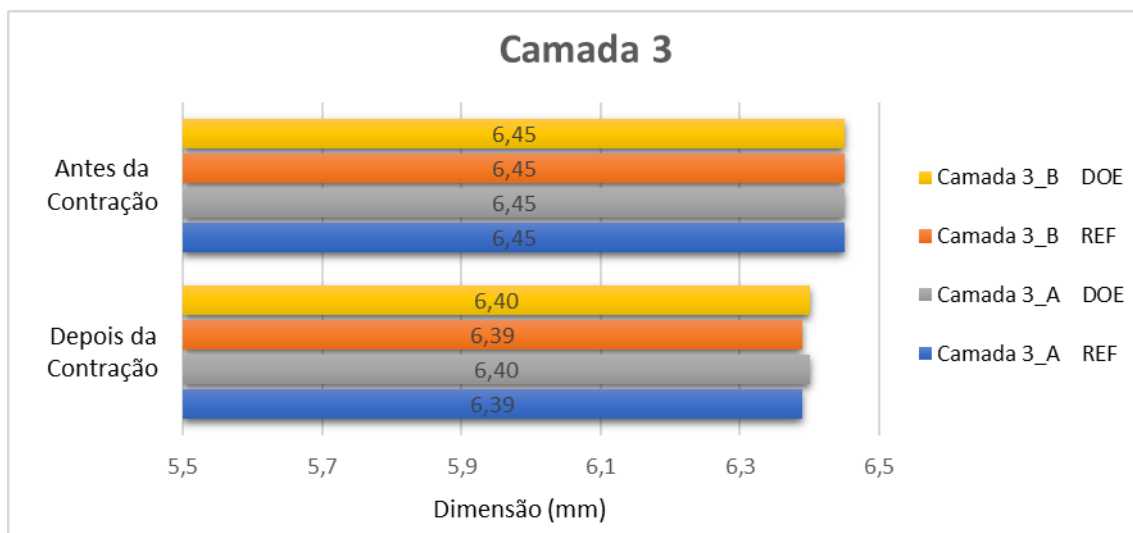


Figura 39 - Gráfico das variações dimensionais da Camada 3

Tendo em conta as dimensões projetadas para a peça em questão (Figura 57 – Anexo B) existiu a necessidade de estudar mais concretamente quais as variações entre as dimensões projetadas e as obtidas depois da deformação, originada pelas contrações e os empenos resultantes do processo de moldação da peça. Depois de uma análise detalhada dos gráficos, observaram-se ligeiras diferenças entre as dimensões antes da contração e depois da contração do polímero nas três camadas do casquilho. Estas ligeiras variações dimensionais observam-se pelo facto da simulação estabelecida como referência já representar um cenário bastante favorável ao processo de moldação e engloba os seguintes critérios:

- as condições de processamento aplicadas na simulação numérica regem-se pelos parâmetros recomendados para o processamento do material em questão;
- Não foi projetado nem simulado nenhum sistema de controlo de temperatura do molde e, por conseguinte, não foi tida em conta a não-uniformidade da distribuição da temperatura do molde.

De qualquer forma essas diferenças existem e apesar de serem ligeiras no contexto em questão, podem-se tornar mais significativas num contexto mais realista. Procedendo a uma análise mais detalhada, designadamente uma análise camada a camada, pode-se dizer que relativamente à primeira camada, as variações dimensionais

são inferiores às restantes camadas, o que se pode justificar pelo facto desta camada estar em contacto direto com o inserto em duas superfícies causando efetivamente um maior constrangimento às deflexões da peça. A camada 2 apresenta já algumas variações dimensionais ligeiramente superiores em relação à camada 1 e a camada 3 apresenta variações dimensionais superiores às da camada 2. É de facto evidente que quanto maior o contacto com o inserto metálico e consequentemente maior o constrangimento, menor é a variação dimensional da camada, originada também pelas menores deflexões que são geradas na camada de plástico da peça sobre-moldada que se localiza em zonas junto ao inserto.

Comparando os lados do ponto de injeção (B) com o lado onde se forma a maior parte da linha de soldadura (A), nota-se claramente que não existem quaisquer diferenças significativas relativamente às dimensões após a deformação, o que resulta em variações dimensionais praticamente insignificantes. Como já referido antes, o lado onde se forma a linha de soldadura é considerado um ponto crítico desta peça, sendo que perante os resultados apresentados, esse facto não se comprova, existindo um comportamento bastante semelhante entre os dois lados da peça. Pode-se verificar que as variações dimensionais não afetam as cotas críticas da peça, especificamente do subcomponente plástico.

4.3.1 Variações Dimensionais com pré-aquecimento dos insertos

Tal como foi delineado na metodologia e com base na revisão de literatura, o aquecimento dos insertos é uma das medidas que se pode adotar para a melhoria da qualidade da peça sobre-moldada, nomeadamente ao que às deflexões e variações dimensionais diz respeito. Neste caso optou-se por simplificar o estudo, sendo analisado apenas o lado onde se forma a linha de soldadura. Procederam-se a três simulações numéricas em que os insertos foram aquecidos a 50°C, 100°C e 120°C juntamente com as condições de processamento otimizadas pelo DOE. Os resultados obtidos para as dimensões das 3 camadas após a contração estão apresentados abaixo.

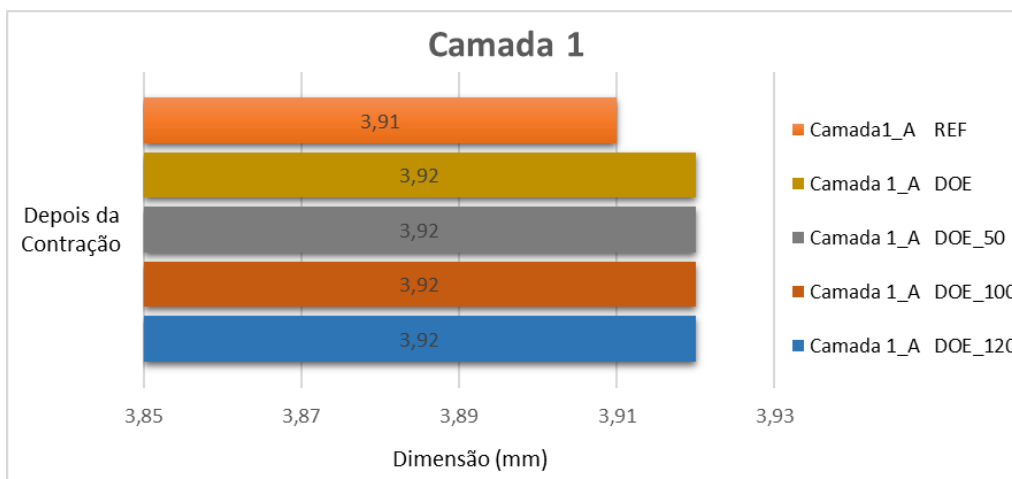


Figura 40 - Gráfico da dimensão da camada 1 depois da deformação

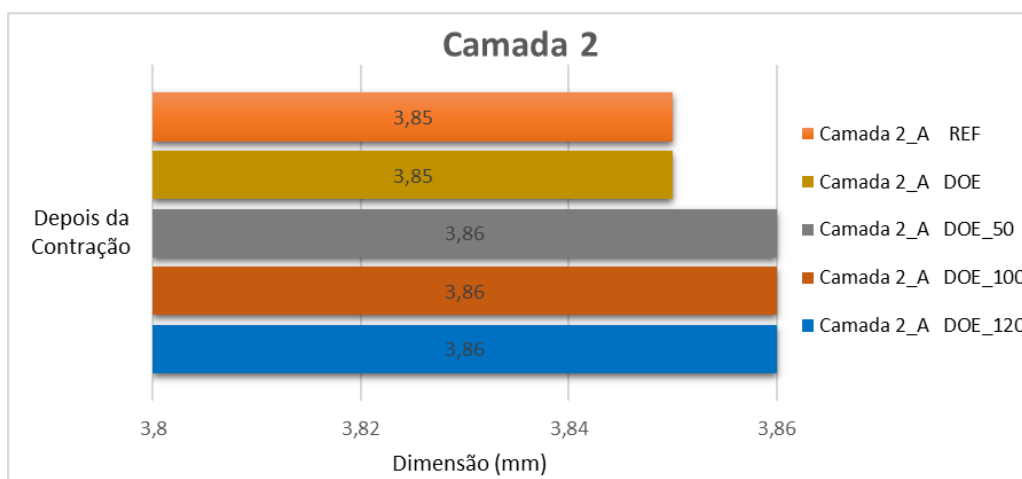


Figura 41 - Gráfico da dimensão da camada 2 depois da deformação

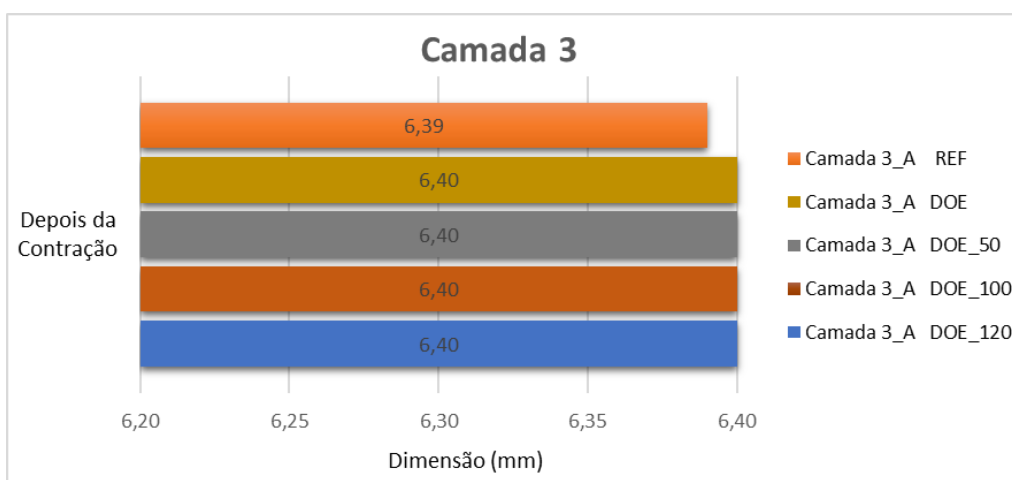


Figura 42 - Gráfico da dimensão da camada 3 depois da deformação

Com recurso aos resultados apresentados nos gráficos anteriores é mais uma vez perceptível que as dimensões após a deformação das camadas causada pela contração do polímero são diferentes apenas em relação à simulação referência para todas as camadas. O facto da simulação referência apresentar uma dimensão menor depois da contração, revela que a variação das dimensões é ligeiramente superior, originada pelas maiores deflexões verificadas. Comparando com as soluções otimizadas, o aumento da temperatura dos insertos não reflete qualquer melhoria nas dimensões de qualquer uma das camadas. De referir mais uma vez que o facto da simulação referência já refletir um cenário bastante vantajoso, aliado às reduzidas dimensões das camadas em estudo, contribuem para que não se verifiquem grandes variações nos resultados. Perante isto, é possível afirmar que do ponto de vista dimensional, existe um cumprimento das cotas críticas de projeto.

4.4 Contrações

Após serem estudadas as dimensões das diferentes camadas e as respetivas deflexões, procedeu-se a uma análise das contrações que causam a variação dimensional das camadas delimitadas pelos nós selecionados. Portanto, foram analisadas as percentagens das contrações causadas nas dimensões de cada uma das três camadas, tanto do lado da linha de soldadura como do lado do ponto de injeção.

Além de serem avaliadas as contrações na simulação referência e na simulação otimizada através do DOE, procedeu-se também a uma avaliação das contrações depois se aquecer o inserto de latão a 50°C, 100°C e 120°C. O gráfico representado na Figura 43 representa o comportamento em termos de contrações de cada uma das camadas delimitadas pelos nós selecionados e respetivos lados da soldadura e do ponto de injeção de cada uma das simulações numéricas, incluindo a referência, a otimizada pelo DOE e as simulações representativas do aquecimento do inserto metálico.

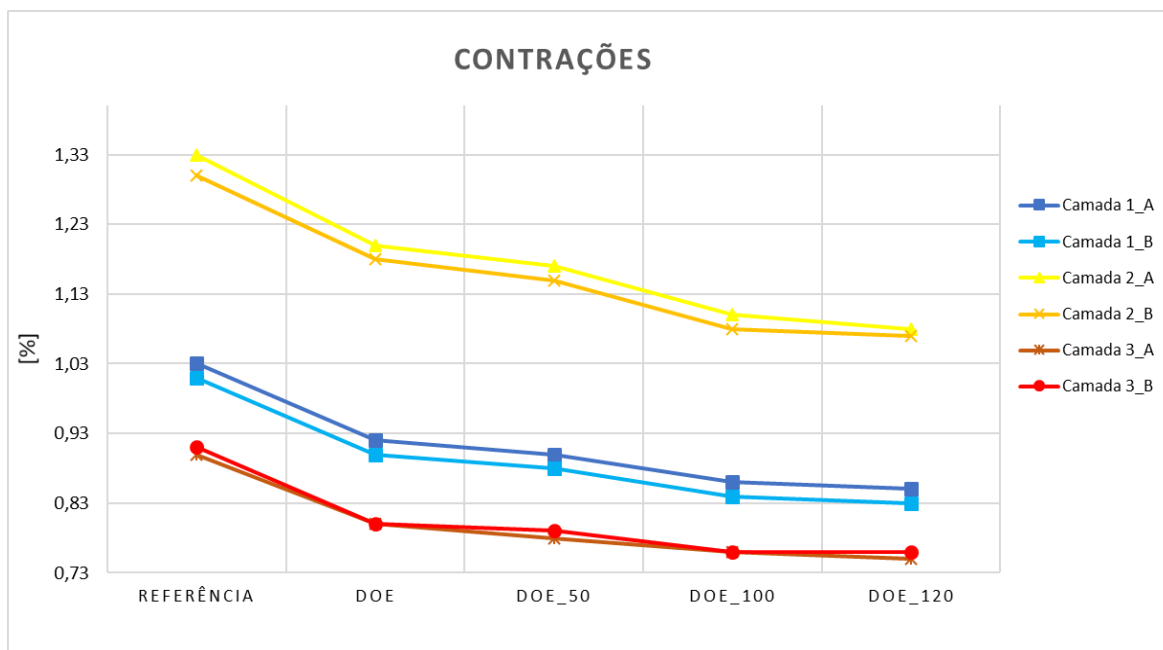


Figura 43 - Percentagem de Contrações nas várias simulações numéricas

Analisando o gráfico anterior é facilmente perceptível que a camada 2 apresenta as maiores percentagens de contração, seguida da camada 1 e finalmente a camada 3. O facto da camada 2 estar em contacto com o inserto de latão contribui para um maior constrangimento à contração do plástico em redor do inserto. A camada 1 apresenta contrações menores comparativamente com a camada 2, devendo-se ao facto de ter uma grande superfície de contacto com o inserto, induzindo um arrefecimento mais rápido do polímero, apresentando contrações menores. O facto da dimensão da camada 1 ser ligeiramente superior à dimensão da camada 2 é um fator que contribui para as contrações verificadas na camada 2 serem superiores. As menores percentagens de contração foram observadas na camada 3, pelo facto de não estar diretamente em contacto com o inserto, podendo contrair livremente. De um modo geral pode-se observar que as camadas em contacto com o inserto apresentam maiores percentagens de contração. Todas as considerações feitas anteriormente são aplicadas para todas as simulações numéricas, tal como se pode observar na Figura 43.

No que diz respeito à comparação entre o lado onde se forma a maior parte da linha de soldadura e o lado do ponto de injeção, pode-se constatar a existência de diferenças um pouco mais significativas do que as verificadas nas variações dimensionais. Nas

camadas em contacto com o inserto (camadas 1 e 2) é possível observar que o lado onde se forma a linha de soldadura apresenta contrações superiores ao lado do ponto de injeção para todas as simulações numéricas. Relativamente à camada 3 apresenta contrações superiores correspondentes ao lado do ponto de injeção para a maior parte das simulações. Apesar de serem pouco significativas, denotam-se maiores contrações no lado da linha de soldadura para as camadas em contacto com o inserto e maiores contrações do lado do ponto de injeção para a camada que não se encontra em contacto direto com o inserto.

Numa apreciação mais geral é perceptível que a otimização feita pelo DOE melhora de forma significativa as contrações causadas em todas as camadas, comparativamente com a simulação numérica de referência. Este facto comprova a eficácia do DOE neste estudo e que revela que a combinação de condições de processamento obtidas pelo DOE são as melhores a serem aplicadas para a peça em questão, na tentativa de melhorar as contrações e, conseqüentemente, a qualidade e durabilidade da peça. Relativamente às simulações que representam o aquecimento dos insertos pode-se verificar que o aumento da temperatura dos insertos torna-se benéfico para a diminuição das contrações causadas nas diferentes camadas da peça sobre-moldada. Neste caso em particular, o aquecimento do inserto de latão só se revela efetivamente benéfico na diminuição das contrações se for aquecido até aos 100°C, sendo que a partir daí a diminuição das contrações começa a estagnar, corroborando o que foi verificado na revisão bibliográfica [2].

4.5 Linhas de Soldadura

As linhas de soldadura criadas na parte plástica podem causar graves problemas, tanto ao nível estrutural como ao nível estético. A linha de soldadura é um ponto de fragilidade que se forma quando duas ou mais frentes de enchimento se encontram durante o processo de enchimento. As linhas de soldadura podem ser formadas também quando se dá o escoamento de material à volta de furos ou de peças com insertos, devido a peças que são obtidas através de múltiplos pontos de injeção ou através de uma variação da espessura das camadas de plástico onde ocorre o fenómeno da

“hesitação” ou do “*race tracking*”. Na eventualidade das diferentes frentes de enchimento arrefecerem antes de surgir o encontro das mesmas, estas não se interligam de uma forma correta, podendo causar uma fraqueza na parte plástica e o aparecimento de marcas visíveis na peça como uma linha demasiado demarcada, entalhes na camada de plástico e até diferenças na cor, fator que influencia os requisitos estéticos da peça [27].

Existem dois tipos diferentes de linhas de soldadura: as *weld lines* formadas quando duas frentes de enchimento que escoam em duas direções opostas se encontram e as *meld lines* formadas quando se dá a junção de frentes de enchimento com um escoamento paralelo um ao outro, criando uma união entre elas [31]. Ambos os tipos de linha de soldadura estão representados na Figura 44.

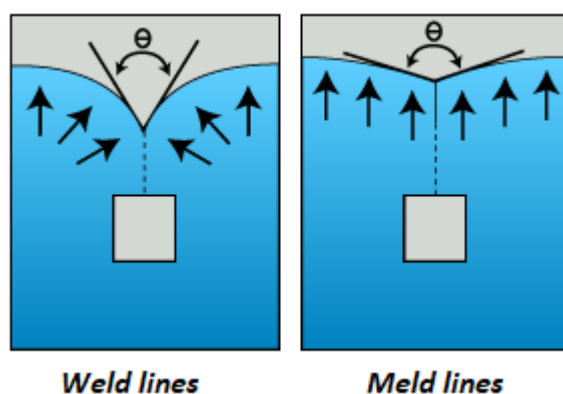


Figura 44 - Linhas de Soldadura (adaptado de [28])

Uma forma mais tradicional e prática usada para diferenciar os dois tipos de linha de soldadura é o ângulo de junção das frentes de enchimento, θ , sendo estabelecido que a formação de uma *weld line* ocorre quando o ângulo é inferior a 135° e a formação de uma *meld line* ocorre quando o ângulo é superior a 135° . Normalmente as *meld lines* são mais fortes estruturalmente que as *weld lines* e são muitas vezes menos visíveis, tornando-se mais vantajosas do ponto de vista estético.

Aplicando a avaliação das linhas de soldadura ao caso de estudo, foram retirados os valores da amplitude dos ângulos que proporcionam a formação da linha de soldadura

do casquilho para a simulação obtida através das condições de processamento de referência. Os ângulos das linhas de soldadura estão representados na Figura 45.

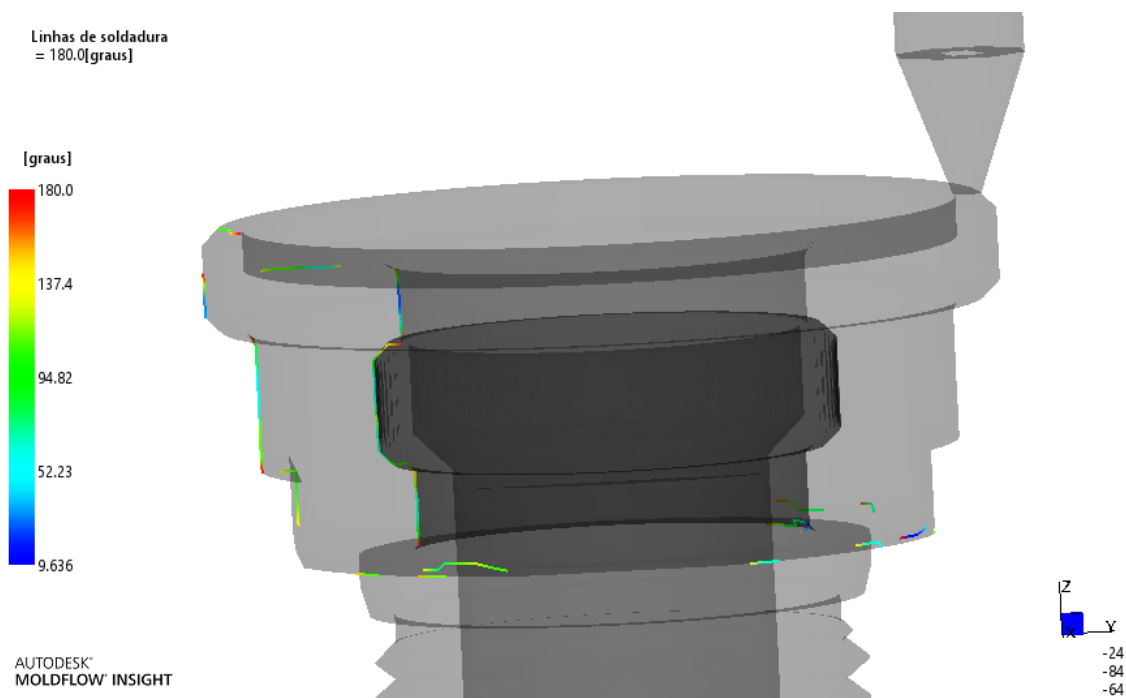


Figura 45 - Ângulos de junção das frentes de enchimento: simulação referência

De acordo com os resultados observados, constata-se que a maior parte das linhas de soldadura são formadas com um ângulo de junção das frentes de enchimento menor que 135° , existindo algumas zonas particulares (representadas a amarelo e vermelho na Figura 45) nas quais a amplitude do ângulo é superior a 135° . Este facto revela que nesta simulação com parâmetros de referência são formadas na sua maioria *weld lines*, sendo que em zonas particulares da camada de plástico são também formadas *meld lines*, proporcionando uma melhor qualidade na peça nessas mesmas zonas. Quanto à maioria das linhas de soldadura formadas, o facto de serem *weld lines* contribuiu para o facto de se considerar este lado da peça como um ponto crítico e que foi uma das motivações para o estudo desta peça em particular, pela razão de ser uma zona mais suscetível à fratura e ao rompimento do plástico.

As condições de processamento são fulcrais para determinar a qualidade da linha de soldadura formada. Na sua generalidade, uma boa linha de soldadura forma-se quando

a temperatura à qual as frentes de enchimento se encontram não é 20 °C inferior à temperatura de injeção do polímero [27]. Com o intuito de comprovar a qualidade das linhas de soldadura formadas na camada de plástico da peça em estudo, foram verificadas as temperaturas da frente de escoamento do polímero aquando do momento da formação das mesmas.

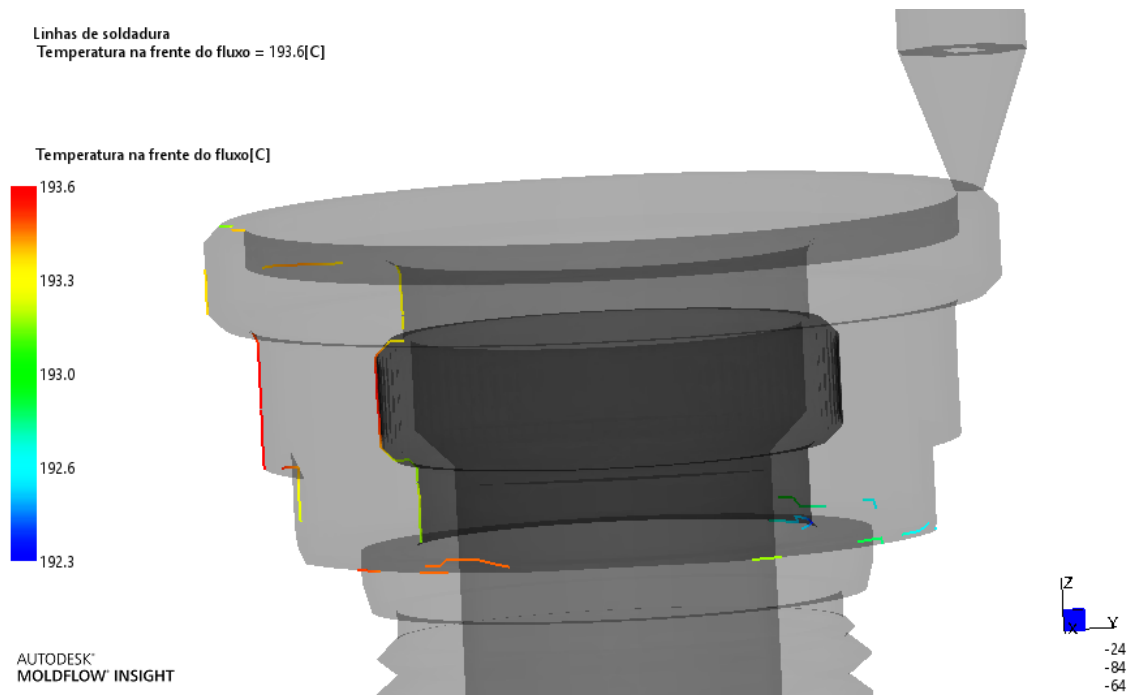


Figura 46 - Temperatura de formação das linhas de soldadura

Observando os resultados apresentados anteriormente, pode-se dizer que a temperatura da frente de fluxo aquando da formação das várias linhas de soldadura não é 20°C inferior à temperatura de injeção do polímero, neste caso 190°C, apresentando, inclusive, temperaturas até superiores. Estas temperaturas superiores podem ser justificadas pelo contacto das frentes de enchimento com o inserto metálico e com o próprio molde durante a injeção do POM, causando uma certa fricção o que faz aumentar a temperatura da frente de fluxo.

4.6 Tensões Residuais

Feita a análise de contrações, deflexões e consequentes variações dimensionais que advêm do processamento da peça em estudo, houve a necessidade de atentar na análise de tensões residuais induzidas durante a moldação de uma peça sobre insertos metálicos. As tensões residuais são um dos problemas que mais repercussão tem neste processo, segundo a bibliografia existente. Recorrendo à utilização de um software de simulação estrutural, o ANSYS, foram obtidos os resultados relativos às tensões de von Mises por se tratar de um material dúctil. Como mencionado na metodologia, partiu-se de uma simulação estrutural estática mais comum neste tipo de estudos, sendo que foi simulada a peça sem o seu histórico de processamento. É de referir que o termo deformação, mencionado adiante corresponde, na realidade, ao deslocamento de um determinado nó da sua posição inicial/nominal, ou seja, antes da contração e cuja utilização foi adaptada para uma melhor compreensão dos resultados, uma vez que o termo utilizado para a designação do título deste resultado em língua inglesa é “deformation” como se pode verificar na Figura 47. Nas Figuras 47 e 48 apresentam-se, respetivamente, a distribuição das deformações totais e das tensões geradas ao longo de toda a peça.

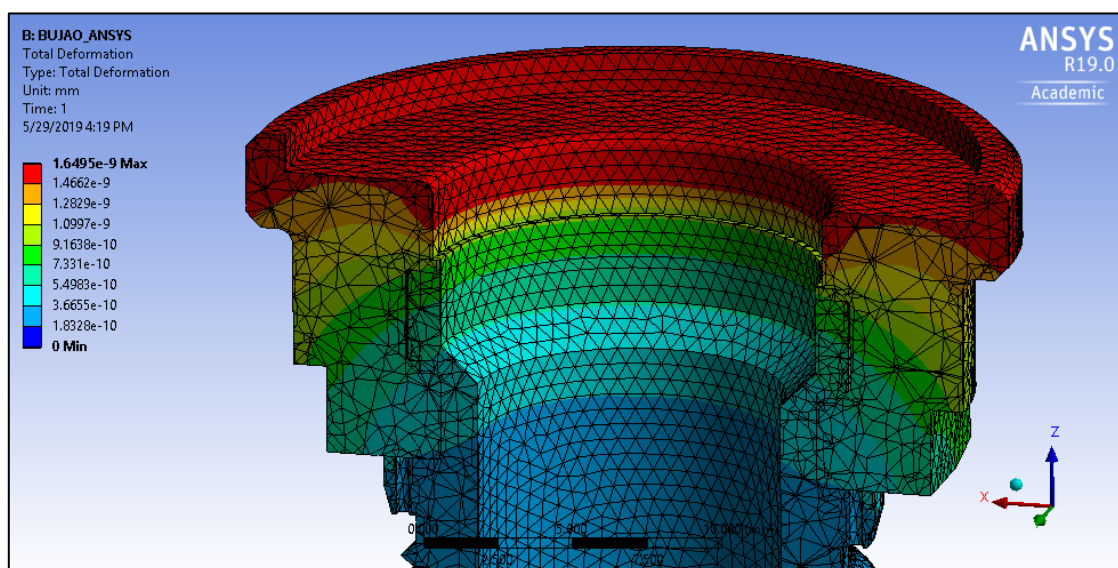


Figura 47 - Deformações sem histórico de processamento

Pode-se verificar que devido à magnitude quase insignificante da pressão aplicada (1 Pa), seria expectável que estas mesmas deformações causadas fossem também praticamente insignificantes.

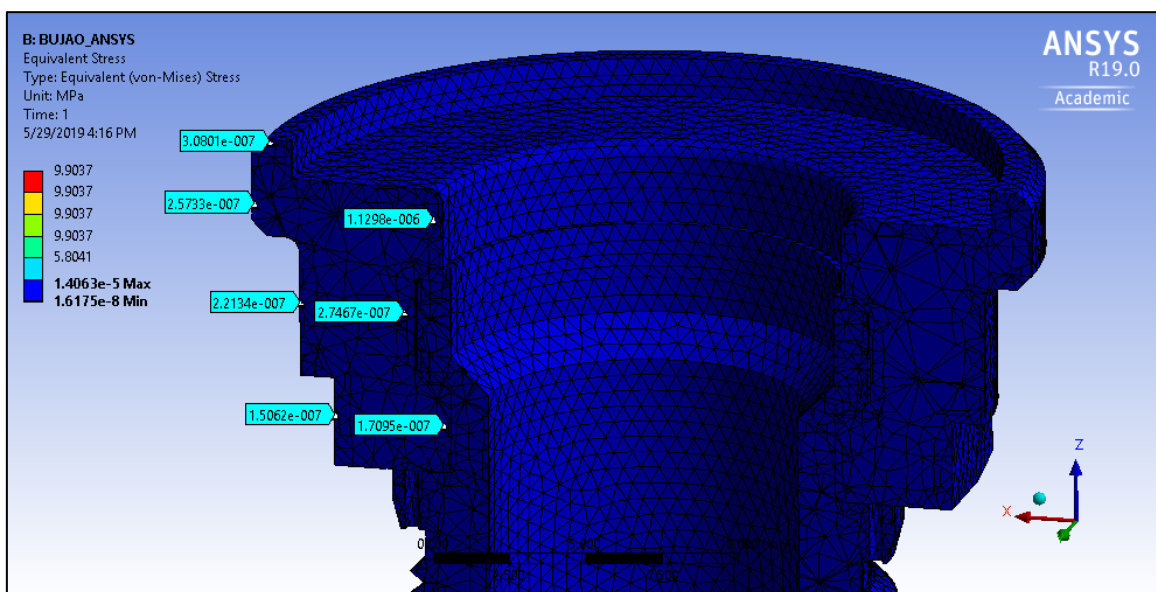


Figura 48 - Tensões sem histórico de processamento

À semelhança das deformações totais, seria de esperar que as tensões apresentadas para esta simulação estrutural estática fossem praticamente insignificantes, o que se pode claramente observar pela distribuição de tensões ao longo da parte plástica da peça em estudo. A magnitude das tensões apresentadas é muito próxima do valor de pressão aplicado, o que revela que segundo esta simulação a peça não terá qualquer problema de fratura devido às tensões induzidas, como seria de esperar. Este estudo não tem qualquer significado físico, sendo aqui apresentado para efeitos de comparação com os resultados a jusante, dada a incerteza inerente à metodologia aplicada na importação de resultados com histórico de processamento.

4.6.1 Tensões Residuais: Importação do Histórico de Processamento

Com o intuito de cumprir um dos objetivos preconizados para esta dissertação, nomeadamente prever o comportamento desta peça sobre-moldada aquando em

serviço sujeita a cargas típicas, houve a necessidade de criação de simulações numéricas nas quais fosse possível incluir o histórico de dados de processamento vindos da simulação do processo de moldação por insertos. Esse histórico de dados incluiria as contrações, deflexões e mais precisamente as tensões residuais que se geram e acumulam na parte plástica. A distribuição das deformações e das tensões na simulação otimizada pertencentes simulação com histórico de processamento podem ser vistas nas Figuras 49 e 50, respetivamente.

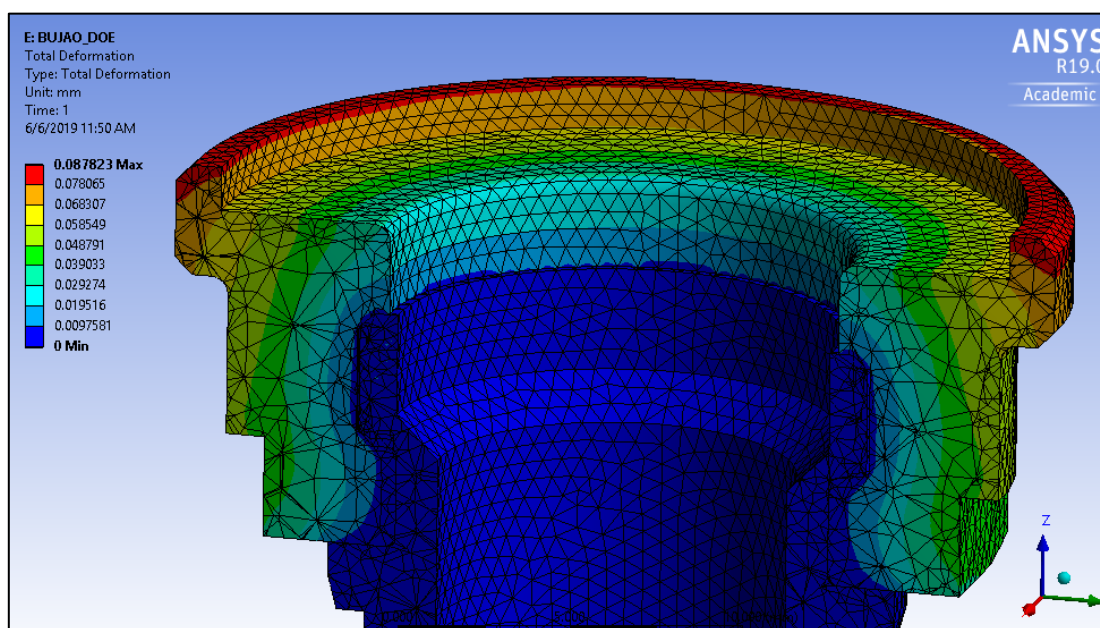


Figura 49 - Deformações na Simulação Otimizada no ANSYS

Tal como se pode verificar através do padrão de deformações ao longo da peça, com especial enfoque no plano transversal criado, as deformações totais que surgem no ANSYS correspondem às deflexões totais verificadas nos resultados originados no AMI® (Figura 36). A grande semelhança no mapeamento das deformações do ANSYS com as deflexões verificadas no AMI são um factor que sustenta a legitimidade da metodologia de importação do histórico de processamento. Nota-se então, que as deformações são também muito pequenas, sendo que à medida que se vão observando as zonas mais afastadas do inserto, a deformação na peça é progressivamente maior. Esta constatação é consistente com o observado na análise das deflexões do AMI®, sendo possível

observar a influência do inserto enquanto constrangimento mecânico, já evidenciado anteriormente.

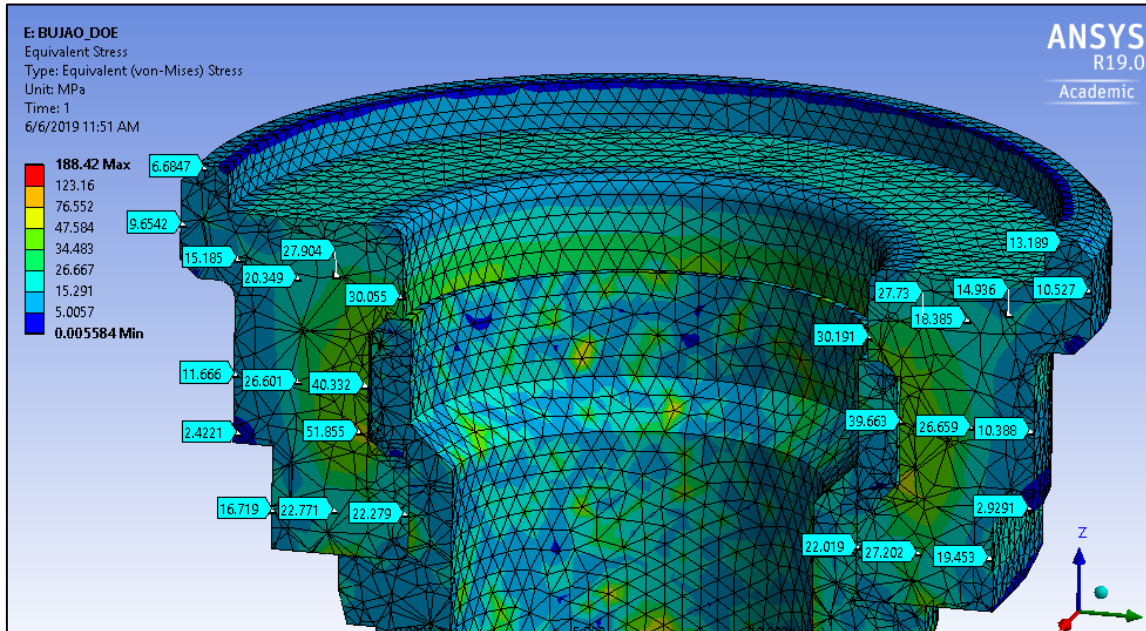


Figura 50 - Tensões da Simulação Otimizada no ANSYS

Avaliando as tensões, pode-se observar, desde já, que as zonas da parte plástica que se localizam mais próximas do inserto são onde se verificam tensões maiores, algo que já seria esperado, pelo facto de serem zonas muito restringidas quanto à expansão do polímero. Relativamente às camadas 1 e 2, as tensões observadas nestas zonas são superiores comparativamente à camada 3, revelando mais uma vez que as zonas com maiores constrangimentos têm a tendência a acumular tensões de maior magnitude no subcomponente plástico.

Comparando a magnitude das tensões residuais induzidas na simulação estrutural na qual se importou diretamente a peça para o *software* sem os dados do seu processamento com a simulação estrutural com os dados do histórico de processamento das condições otimizadas, é possível verificar grandes diferenças nos valores das tensões equivalentes. O facto de existir esta diferença mostra claramente que quando uma peça é analisada estruturalmente com o histórico de processamento, existem tensões acumuladas nas camadas de plástico, designadas tensões residuais. Em

zonas mais próximas do inserto, a acumulação de tensões residuais é maior e em zonas mais periféricas da peça as tensões residuais são menores. Por apresentarem uma espessura similar e estarem ambas em contacto direto com o inserto metálico, procedeu-se à comparação das tensões residuais observadas nas camadas 1 e 2. É de notar que na camada 2 as tensões junto do inserto são entre 40MPa e 55MPa e nas zonas mais periféricas são cerca de 10MPa, representando uma diminuição de cerca de 75% da magnitude das mesmas ao longo da camada. Na camada 1 as tensões junto do inserto são cerca de 30MPa e nas zonas mais exteriores rondam os 20MPa, o que corresponde a uma diminuição de cerca de 33%. Como a camada 3 apresenta uma espessura maior e não está em contacto direto com o inserto, a zona mais interior tem valores de tensão de 30MPa, semelhantes à camada 1, sendo que nas zonas mais exteriores as tensões residuais são abaixo dos 10MPa.

Tendo como ponto de estudo a comparação entre o lado da linha de soldadura e o lado onde é injetada a peça, observa-se na Figura 50 uma distribuição das tensões ao longo do corte transversal bastante semelhante. Em termos de valores, as diferenças são bastante ténues, podendo-se verificar uma distribuição das tensões uniforme nas zonas diametralmente opostas.

É de realçar, novamente, que estas duas simulações não têm qualquer significado físico e servem apenas para comprovar que o processo de moldação por insertos induz a acumulação de tensões residuais no subcomponente plástico e que estas devem ser consideradas quando se pretende prever o comportamento destas peças aquando em serviço.

4.6.2 Comportamento da peça em serviço

Depois de ser efetivada a existência de tensões residuais geradas aquando do seu processo de moldação e comprovada a importância de uma análise estrutural com o histórico de dados de processamento para uma correta previsão do comportamento de uma peça sobre-moldada aquando em serviço, decidiu-se simular o comportamento da peça quando submetida ao teste de funcionalidade. Para esse efeito executou-se uma nova simulação estrutural estática da peça, processada com a combinação de

parâmetros otimizada juntamente com os dados do histórico de processamento. Tal como descrito anteriormente, a peça foi sujeita a uma pressão de 3MPa ao longo do seu interior (Figura 33), simulando a pressão máxima a que uma tubagem é sujeita para cumprir as normas de funcionamento da peça. Na Figura 51 apresenta-se a distribuição das deformações ao longo da peça provenientes da simulação estrutural em ANSYS dos parâmetros otimizados.

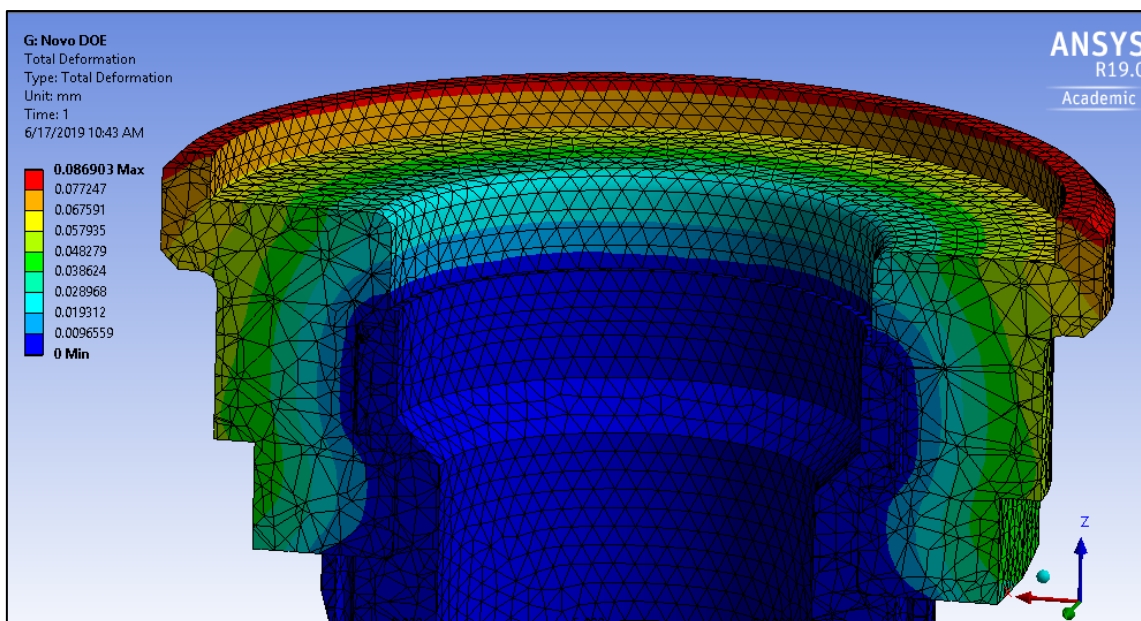


Figura 51 - Deformações da Simulação otimizada em ANSYS

É facilmente perceptível que quando se sujeita a peça a uma pressão máxima da tubagem, as deformações existentes são bastante pequenas, praticamente impercetíveis à escala real. Quando a peça se encontra em serviço, é possível verificar que esta terá uma deformação menor nas zonas localizadas junto ao inserto e uma deformação maior nas zonas mais periféricas. Em posições da peça diametralmente opostas, verifica-se uma distribuição de tensões bastante semelhante, sendo que quando sujeita às pressões de serviço, a diferença entre o lado da linha de soldadura e o lado do ponto de injeção é praticamente inexistente. Obviamente que esta seria a distribuição de deformações esperada, tendo em conta o que já tinha sido verificado na análise do processamento da peça (Figura 36). A magnitude das deformações é ligeiramente superior à verificada durante o processo de moldação da peça, pelo facto de ser sujeita à pressão máxima aquando em serviço. Do ponto de vista dimensional, a

peça apresenta um comportamento de acordo com as normas de funcionamento da mesma, legitimando-a quanto ao cumprimento de cotas críticas de projeto nas diferentes camadas.

Nas Figuras 52 e 53 podem ser vistas a distribuição das tensões equivalentes à pressão máxima em serviço, para o conjunto da peça e subcomponente plástico, respectivamente.

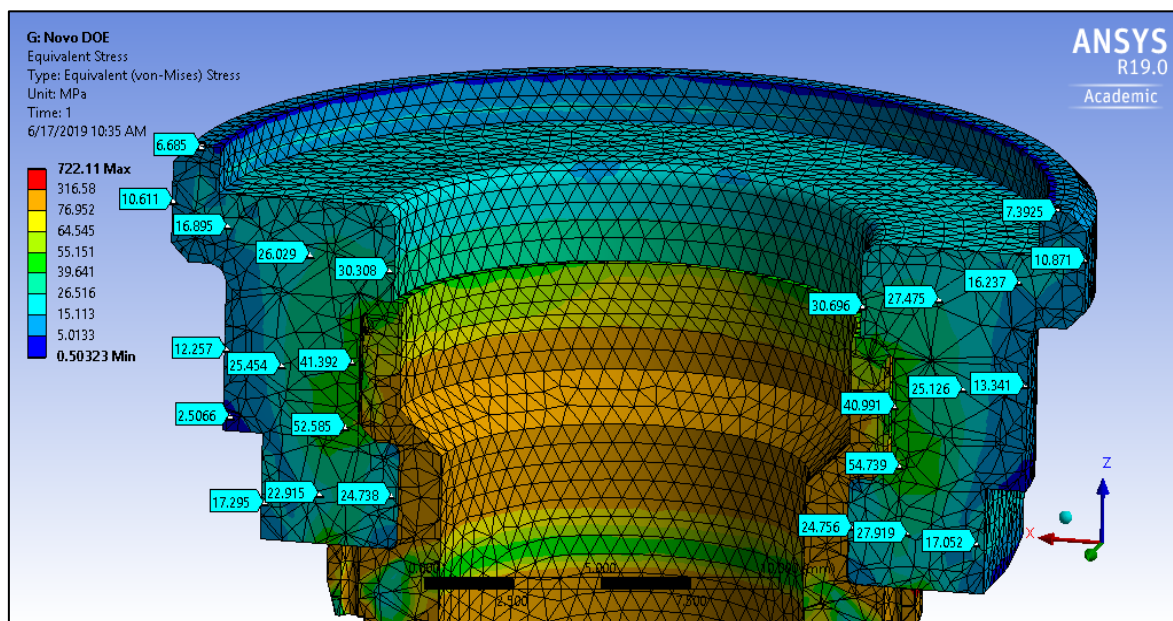


Figura 52 - Tensões na Simulação Otimizada em ANSYS (peça)

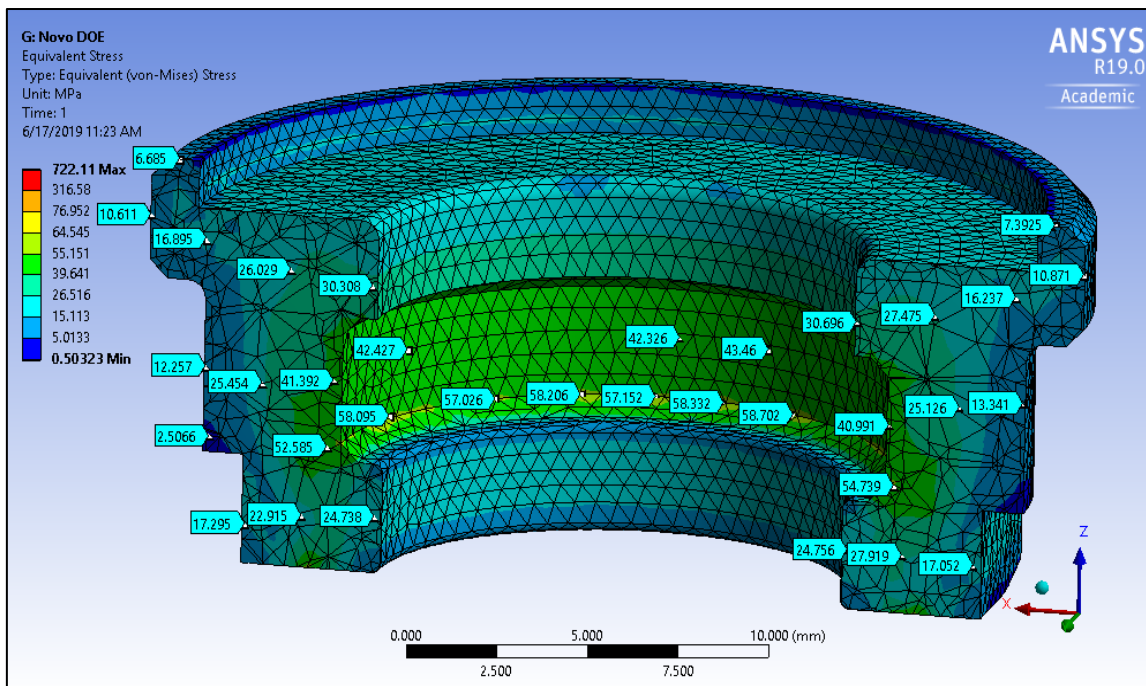


Figura 53 - Tensões na Simulação Otimizada em ANSYS (subcomponente plástico)

Baseado no que se pode ver nas figuras anteriores, quando se aplica a pressão máxima das tubagens simulando o teste de funcionalidade, verifica-se uma distribuição das tensões muito semelhante à distribuição verificada na Figura 50, na qual se pôde efetivar a existência de tensões provenientes do histórico de processamento. Aquando em serviço, nas zonas junto ao inserto, a magnitude das tensões é maior do que nas zonas mais exteriores do subcomponente plástico, sendo essa diferença mais visível na camada 2. Considerando a suscetibilidade inerente ao *design* das peças sobre-moldadas, o facto desta camada estar em contacto direto com uma parte do inserto que apresenta uma saliência relativamente ao subcomponente plástico, constitui uma particularidade da peça que pode justificar a existência de tensões maiores nessa camada. Relativamente à camada 1 que também está em contacto direto com o inserto, as tensões geradas junto ao inserto são menores e a sua distribuição mais uniforme, comparativamente à camada 2. Desta forma pode-se estabelecer uma ligação entre as contrações diferenciais observadas e as tensões residuais induzidas no material, essencialmente pelo constrangimento mecânico imposto pelo inserto metálico. Como analisado previamente a contração diferencial é notória quando se constata que a camada 2 é a que apresenta maior percentagem de contração, sendo que o mesmo se verifica quando se observam os resultados das tensões residuais. A camada 1 apresenta

maiores percentagens de contração na sua dimensão comparando com a camada 3 e ao mesmo tempo apresenta maiores tensões acumuladas ao longo da sua dimensão. É possível então estabelecer um paralelismo entre a contração diferencial que a peça sofre durante o seu processamento e o nível de tensões acumuladas.

As diferenças existentes entre o lado da linha de soldadura e o lado do ponto de injeção aquando em serviço são praticamente insignificantes, sendo que nenhum dos lados se revela crítico, ao contrário do que se tinha preconizado anteriormente.

Quando se analisa o comportamento mecânico do polímero relativamente à tensão de cedência do material (cerca de 38MPa), constata-se que existem partes do subcomponente plástico, nomeadamente na camada 2 nas zonas junto ao inserto (maioritariamente representadas a verde), onde esse valor é ultrapassado, passando o material a comportar-se em regime plástico. Este fator pode ter implicações na resistência estrutural da peça, na medida em que a torna mais frágil, menos resistente mecanicamente e mais suscetível à fratura do plástico, afetando diretamente o seu comportamento aquando em serviço.

O modelo linear elástico adotado para caracterizar o comportamento mecânico do POM, pode constituir uma limitação a este estudo, na medida em que ao existirem zonas da peça que ultrapassam o limite de elasticidade do polímero, passa a ter um comportamento plástico, que neste caso pode não estar a ser simulado da maneira mais fidedigna. Tendo em conta a complexidade da aplicação de um modelo elástico-plástico e a carência de uma metodologia alternativa, deve-se ter em consideração os eventuais defeitos inerentes à metodologia aplicada.

4.6.3 Pré-aquecimento do inserto

Do ponto de vista da qualidade da peça, o facto das tensões serem maiores nas zonas que rodeiam o inserto, pode ter implicações negativas na adesão do subcomponente plástico ao inserto metálico. Na tentativa de contornar este e outros problemas inerentes à moldação por insertos metálicos, foi executada uma nova simulação estrutural estática recorrendo ao ANSYS com o objetivo de perceber qual o comportamento desta peça se o inserto for sujeito a um pré-aquecimento antes da sua

incorporação no molde. Nesta simulação o inserto metálico é pré-aquecido até aos 100°C, pelo facto de no capítulo referente às contrações ter-se constatado que aquecer a uma temperatura superior a esta, não apresenta melhorias significativas nos resultados. De referir que as condições de processamento utilizadas são as otimizadas pelo módulo de otimização do DOE, apenas sendo modificada a temperatura inicial do inserto de latão.

A distribuição das deformações ao longo da peça para esta simulação podem ser vistas na Figura 54.

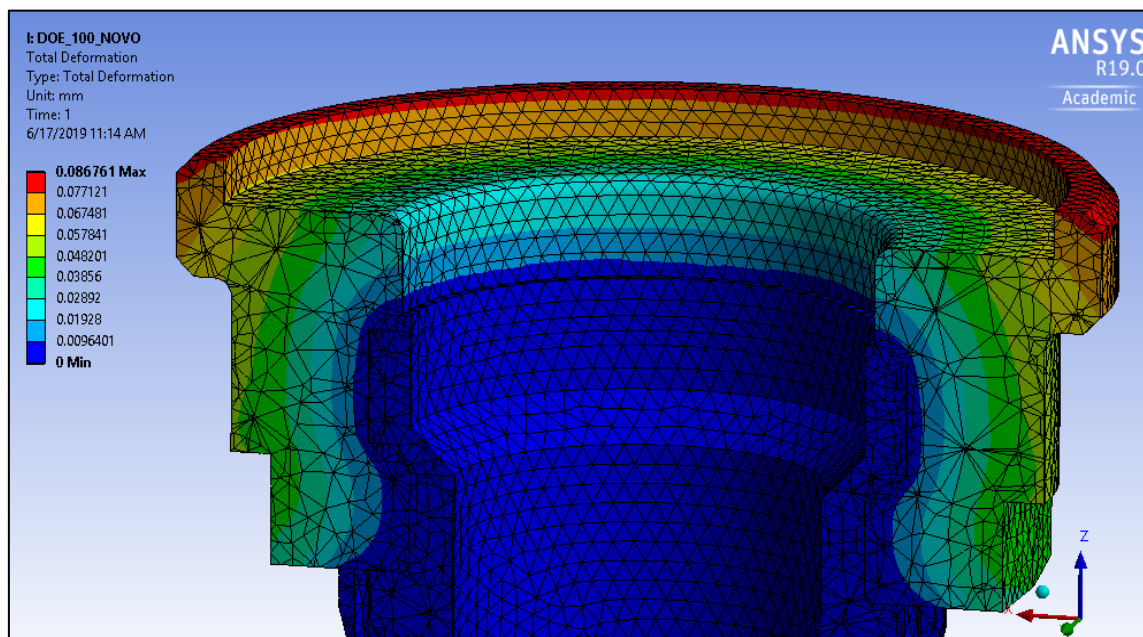


Figura 54 - Deformações da Simulação DOE com pré-aquecimento do inserto

Relativamente às deformações apresentadas, pode-se afirmar que não existe qualquer melhoria quando se procede ao pré-aquecimento do inserto, algo que pode ser justificado pelo facto do cenário em estudo já se encontrar numa fase de otimização muito avançada, levando a que, do ponto de vista dimensional da peça, esta medida não acrescente valor.

No que diz respeito à redução das tensões geradas no subcomponente plástico, esta medida pode ser benéfica. A distribuição das tensões tanto no conjunto da peça como no subcomponente plástico, pode ser vistas nas Figuras 55 e 56, respetivamente.

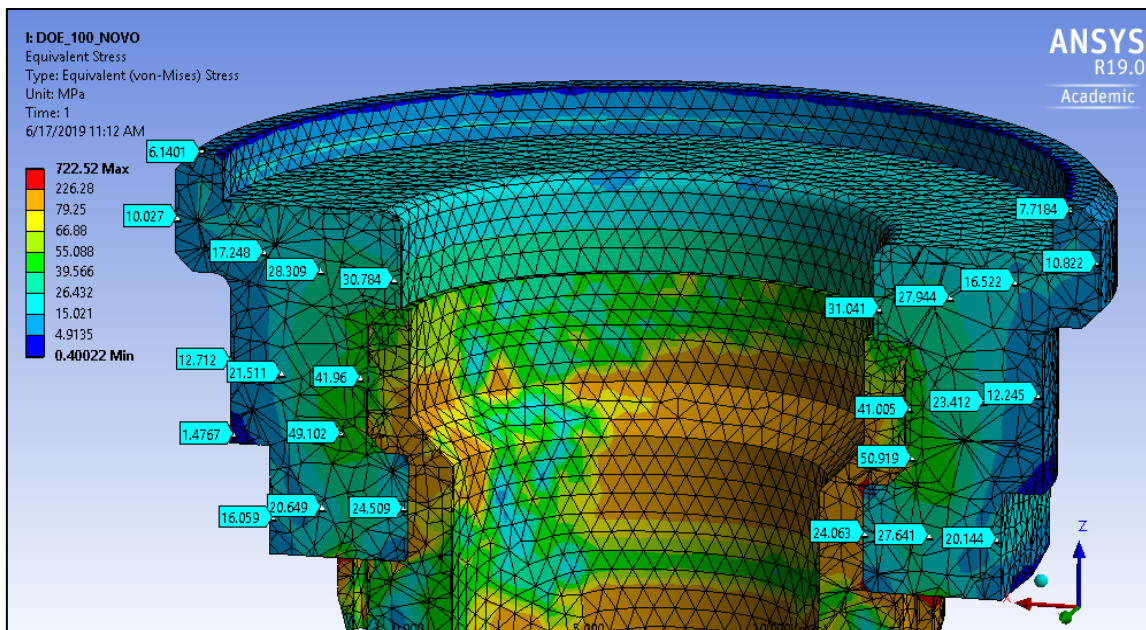


Figura 55 - Tensões na Simulação DOE com pré-aquecimento do inserto (peça)

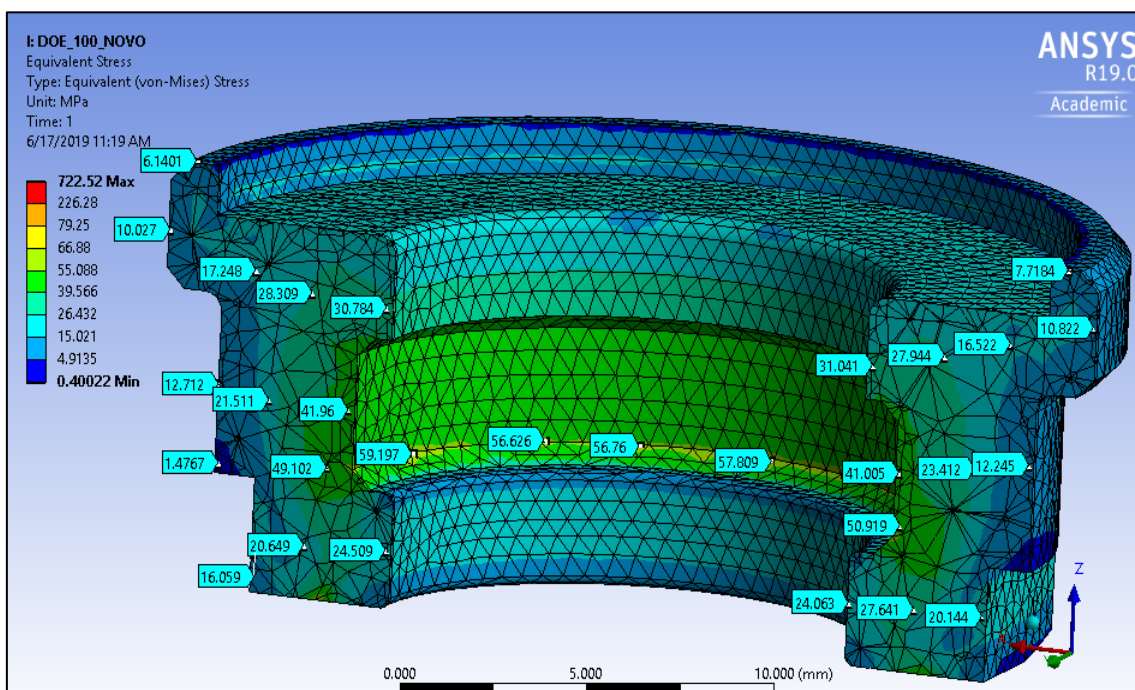


Figura 56 - Tensões na Simulação DOE com pré-aquecimento do inserto (subcomponente plástico)

Observando a distribuição das tensões pré-aquecendo o inserto e comparando com as tensões da simulação otimizada (Figuras 52 e 53), pode-se afirmar que existe uma diminuição da magnitude das tensões em zonas pontuais do subcomponente plástico,

nomeadamente em pontos próximos do inserto, pelo facto desse aquecimento alterar as propriedades do latão em termos de expansão térmica, aproximando o seu comportamento ao do termoplástico usado no subcomponente plástico. O aquecimento dos insertos é também importante na medida em que promovem uma distribuição das temperaturas de polímero e metal mais uniforme, induzindo uma menor acumulação de tensões aquando do processamento da peça e em serviço. Apesar de existirem diferenças ténues, não se pode afirmar que existe efetivamente uma redução das tensões geradas, quando se procede ao pré-aquecimento do inserto. Essas diferenças quase impercetíveis são o reflexo de um cenário de simulação já bastante otimizado.

O pré-aquecimento do inserto é uma medida que já vem referenciada na revisão bibliográfica como sendo positiva para o aumento da qualidade das peças sobre-moldadas com insertos metálicos e, como tal, foi adotada neste estudo com o intuito de prevenir a acumulação de tensões, essencialmente junto ao inserto metálico, diminuindo a probabilidade de rutura da parte plástica. Esta medida deve ser adotada para prevenir o histórico de fratura do subcomponente de plástico, abordado anteriormente.

5. Conclusões do estudo

Neste trabalho foi criada uma metodologia de análise e otimização com a finalidade de prever o comportamento de uma peça sobre-moldada durante o seu processamento e aquando em serviço. A moldação por insertos é um processo de moldação por injeção bastante complexo, pelo facto de apresentar grande suscetibilidade às condições de processamento e às técnicas de *design* aplicadas.

A metodologia incluiu um primeiro estudo das condições de processamento tomando esses valores como referência para o estudo. Posteriormente procedeu-se à otimização das condições de processamento através da ferramenta DOE com o objetivo de reduzir as contrações, originando deflexões e consequentemente empenos no subcomponente plástico. Os resultados do DOE contribuíram para perceber que os parâmetros que mais influência têm nestas simulações são a temperatura do fundido, a temperatura de superfície do molde e a pressão de compactação aplicada, que correspondem a cerca de 90% da influência no processo geral. Conclui-se que o aumento da temperatura do fundido para 210°C, a diminuição da temperatura de superfície do molde para 70°C e o aumento ligeiro da pressão de compactação para 18,60MPa, são alterações benéficas para o aumento da qualidade da peça em termos dimensionais, comprovando o que de bom se pode retirar deste módulo de otimização.

Depois de feitas as análises do processo de moldação por injeção, os resultados mostraram pequenas diferenças em termos de deflexões gerais quando se comparam as simulações de referência com a otimizada. Tal como seria expectável, as deflexões são muito menores nas zonas mais próximas do inserto em comparação com zonas mais periféricas, o que é justificável pela presença do inserto que causa um constrangimento mecânico. Isto reflete-se em ligeiras variações das dimensões das camadas da peça, podendo-se concluir que não é posto em causa o cumprimento das cotas críticas do projeto, mantendo a qualidade dimensional requerida para a peça. Outro ponto de análise consistiu na comparação das variações dimensionais entre o lado do ponto de injeção e o lado da linha de soldadura com clara intenção de estudar a razão pela qual a peça tem um histórico de fratura no lado da linha de soldadura. Os resultados mostraram que não existiam quaisquer diferenças significativas nas deflexões que

revelassem uma eventual justificação para o lado da linha de soldadura ser considerado um ponto crítico.

Facilmente se pode constatar que as diferenças de resultados entre a simulação com as condições de processamento referência e a simulação com as condições otimizadas são ligeiras porque as condições de referência já constituíam um cenário bastante favorável ao processo de injeção da peça. As temperaturas de processo utilizadas na simulação de referência já constituem valores compreendidos entre intervalos ideais de processamento testados pelos próprios fornecedores dos materiais e conjuntamente com as maiores percentagens de influência, remeteriam sempre para um cenário de simulação favorável. Considerar-se um molde monocavidade a uma temperatura constante são outros fatores que contribuem também para uma melhoria não tão significativa, mas que tendo em conta o panorama do estudo são, de certa forma, melhorias positivas. O pré-aquecimento dos insertos não reflete qualquer melhoria do ponto de vista dimensional do subcomponente plástico.

Em termos de contrações diferenciais verificadas nas dimensões das camadas, os resultados já refletem diferenças mais significativas. A otimização levada a cabo pelo módulo do DOE reduz de uma forma significativa as contrações das dimensões de todas as camadas de estudo, na comparação direta com a simulação referência. O pré-aquecimento dos insertos reflete uma redução das contrações, mas apenas é significativa para um aquecimento até cerca dos 100°C. Um aquecimento para além desta temperatura não contribuiu para qualquer melhoria e traria maiores encargos a nível energético e financeiro. As maiores percentagens de contração são verificadas nas zonas junto ao inserto, o que é expectável, visto que são zonas nas quais o polímero não contrai livremente. Como as contrações diferenciais das várias camadas apresentam valores relativamente baixos na sua globalidade, originam deflexões e empenos bastante reduzidos, contribuindo positivamente para que se cumpram os requisitos dimensionais da peça.

Um dos pontos considerado crítico segundo o historial da peça é a zona de formação da linha de soldadura. A análise feita às linhas de soldadura, baseada nos ângulos de junção das frentes de enchimento, demonstrou que a maior parte delas são *weld lines* ($\Theta < 135^\circ$), portanto formam-se devido a frentes de enchimento com direções opostas.

As *weld lines* constituem normalmente linhas de soldadura menos fortes estruturalmente e têm maior probabilidade de apresentarem marcas visíveis na peça, sendo que o facto do POM utilizado ter 30% de fibra de vidro adicionada pode contribuir para se constituírem linhas de soldadura mais enfraquecidas e, consequentemente, justificar o historial de fratura desta peça.

Apesar de pequenas as diferenças das dimensões das camadas, provocadas pelas baixas contrações diferenciais, as análises estruturais realizadas no ANSYS revelam a existência de diferenças mais significativas no que às tensões diz respeito, mantendo o cenário favorável do estudo. Os resultados demonstraram que, quando se importa o histórico de processamento da peça em AMI®, a diferença relativamente à peça sem esse histórico no que toca às tensões acumuladas na peça são bastante significativas. Este facto revela a grande importância deste estudo e da metodologia aplicada para uma correta simulação estrutural da peça em questão, porque ao considerar-se a peça “virgem” nestas simulações, procedem-se a análises estruturais que não correspondem à realidade e que podem levar a uma previsão incorreta das cargas a que estas peças podem estar sujeitas sem fraturar a sua camada de plástico.

A simulação da peça sujeita à pressão máxima do teste de funcionalidade, mostrou que esta não apresentará qualquer problema em termos dimensionais, designadamente deformação aquando em serviço. Pode-se concluir que a peça cumpre os requisitos projetuais no que diz respeito às cotas críticas, não só após a sua extração do processo de moldação, mas também quando for sujeita a cargas típicas de serviço. Do ponto de vista estrutural, existem alguns problemas associados às tensões geradas. O constrangimento criado pelo inserto metálico contribui para a existência de tensões que ultrapassam o limite de elasticidade do polímero na zona próxima do inserto da camada 2. À semelhança do que tinha sido verificado pelas maiores contrações diferenciais, esta pode ser considerada a zona crítica, de uma perspetiva estrutural, evidenciando grande suscetibilidade às particularidades do *design*. Embora a espessura da camada de polímero cumprir os requisitos de *design* para a moldabilidade de peças moldadas sobre insertos metálicos, nomeadamente quanto à expansão térmica do POM relativamente ao latão, a acumulação de maiores tensões e contrações diferenciais nas zonas junto ao inserto, essencialmente na camada 2, podem significar uma distribuição não tão

uniforme da temperatura quanto a pretendida, induzindo as tais tensões térmicas na camada de plástico da peça.

Uma medida que pode ser tomada para contornar a indução de tensões térmicas seria o pré-aquecimento dos insertos. A simulação de uma peça constituída por um inserto pré-aquecido a 100°C aquando em serviço, revelou pequenas melhorias em pontos específicos da zona considerada crítica, podendo essas diferenças serem mais efetivas num contexto real.

De realçar que o modelo linear elástico adotado para caracterizar o comportamento mecânico do POM, pode constituir uma limitação na aplicação desta metodologia. O facto de existirem tensões geradas pelo teste de funcionalidade que ultrapassam a tensão de cedência do material (38MPa), levam a que este entre no regime plástico que neste caso em particular não é simulado da forma mais fidedigna.

Em jeito de conclusão, este estudo torna-se bastante útil na medida em que aplicando esta metodologia, é possível prever de uma forma mais fidedigna o comportamento de peças sobre-moldadas com insertos metálicos durante o seu processamento e aquando em serviço. A correta simulação numérica e estrutural pode contribuir para se prevenir o aparecimento de eventuais defeitos na peça que não se manifestam logo a seguir ao processo de moldação por injeção, podendo acautelar a produção de uma peça defeituosa. Apesar de embrionário e poder conter alguns defeitos pela falta de informação disponível, este estudo constitui uma evolução relativamente aos estudos de moldação por insertos já existentes, pelo facto desta metodologia proceder à importação dos dados do histórico de processamento, sendo assim possível uma melhor previsão do comportamento de peças sobre-moldadas com insertos metálicos aquando em serviço.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

No decorrer desta dissertação foi elaborada uma metodologia capaz de prever o comportamento de uma peça sobre-moldada com insertos durante o seu processo de moldação por injeção e em serviço. Como forma de validar esta metodologia de trabalho, sugere-se a aplicação da mesma a outros casos de estudo, abordando outras peças

moldadas sobre insertos metálicos, com diferentes configurações e formatos e também, envolvendo outro tipo de termoplásticos. Em trabalhos futuros, a simulação do comportamento mecânico de polímeros devidamente caracterizados, incorporando análises mais abrangentes que tenham em conta, por exemplo, modelos de comportamento elástico-plástico e não apenas o linear elástico aqui levado a efeito. Desse modo, poder-se-iam refinar os resultados obtidos. A fim de validar todos os procedimentos aqui propostos, seria interessante proceder a estudos experimentais comparativos.

Por fim, sugere-se uma discretização da malha mais criteriosa na interface entre o polímero e o inserto metálico, para que as interações sejam cada vez melhor simuladas numérica e estruturalmente. Seria ainda interessante simular a peça sujeita a um esforço de fadiga com o histórico de processamento. Portanto, a utilização destes *softwares* torna-se uma ferramenta cada vez mais importante na previsão do comportamento das peças sobre-moldadas por insertos metálicos.

Referências Bibliográficas

1. Goodship, V., *Practical Guide to Injection Moulding*, V. Goodship, Editor. 2004, ARBURG.
2. Zhil'tsova, T.V., et al., *Numerical Simulation of a PBT Component with Molded-in Metal Insert*. Centre for Mechanical Technology and Automation, Department of Mechanical Engineering – University of Aveiro, 3810-193 AVEIRO, Portugal, 2008.
3. Cunha, A., *Moldação por Injecção e Materiais Plásticos.*, in *Manual Do Projectista para Moldes de Injecção de Plástico*. 2003, Centimfe.
4. Gupta, S.K., A. Banerjee, and G. Fowler. *An Overview of Multi-Material Molding Technologies*. 2005 8 Fevereiro 2019]; Disponível em: <http://terpconnect.umd.edu/~skgupta/M3T/>.
5. Cunha, A., *Tipificação de Moldes*, in *Manual Do Projectista para Moldes de Injecção de Plástico*. 2003, Centimfe.
6. *Overmolding & Insert Molding*. ProtoLabs [Disponível em: <https://www.protolabs.com/services/injection-molding/overmolding-insert-molding/>].
7. *Injection molding with an insert*. Manufacturing Guide Sweden AB:[Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/injection-molding-insert>].
8. *Insert Molding*. The Plastics Group of America, 2011.
9. GLS, *Overmold Design Guide*. GLS Corporation, 2004.
10. *Design Considerations for Overmolding and Insert Molding*. ProtoLabs [Disponível em: <https://www.protolabs.com/resources/white-papers/overmolding-and-insert-molding/#insertmolding>].
11. Miller, A.C., *Molded-In Inserts: Precautions and Guidelines*. Engineering Design: a global view of DuPont Polymers, 2002(Spring 1981).
12. Berins, M.L., *Plastics Engineering Handbook of the Society of Plastics Industry*. 1991, Norwell: Kluwer Academic Publishers.

13. Liu, C.J., et al., *Effect of Process Parameters on Warpage of Printer Board with Metal-Insert*. Advanced Materials Research, 2014. **1004-1005**: p. 1141-1146.
14. Izadi, O., et al., *Warpage and bending behavior of polymer–metal hybrids: experimental and numerical simulations*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **98**(1-4): p. 873-885.
15. Tseng, S.-C., K.-J. Chang, and C.-T. Huang, *A study of warpage and its mechanism in sequential overmolding*. Journal of Polymer Engineering, 2010. **30**.
16. Jin, K., et al., *Analysis and design for reducing residual stress and distortion after ejection of injection molded part with metal-insert*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014. **15**(12): p. 2533-2542.
17. Park, H., et al., *A study on the estimation of plastic deformation of metal insert parts in multi-cavity injection molding by injection-structural coupled analysis*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. **83**(9-12): p. 2057-2069.
18. Zhou, H., *Computer modeling for injection molding : simulation, optimization, and control*. 2013: John Wiley & Sons, Inc.
19. Grujicic, M., et al., *Application of Topology, Size and Shape Optimization Methods in Polymer Metal Hybrid Structural Lightweight Engineering*. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2008. **4** (4): p. 305-330.
20. Cheng, X., et al., *Evaluation of tensile properties of a composite-metal joint with a novel metal insert design by experimental and numerical methods*. Chinese Journal of Aeronautics, 2017. **30**(3): p. 1004-1011.
21. Porto, T.R.N., et al., *Molding of Polymeric Composite Reinforced with Glass Fiber and Ceramic Inserts: Mathematical Modeling and Simulation*. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. **2018**: p. 1-14.
22. CUZN37 / CHAPA E FITA G. Leal SA: [Disponível em: https://www.gleal.pt/pt/produtos/chapa_e_fita].

23. Celanese. *HOSTAFORM® C 27021 GV3/30 - POM*. Materials Database: [Disponível em: <http://tools.celanese.com/standard/main/quicksearch/ds/0>].
24. William D. Callister, J., *Fundamentals of Materials Science and Engineering* John Wiley & Sons, Inc, 2001.
25. Sanchez-Caballero, S., et al., *Failure analysis of a plastic modular belt in-service*. Engineering Failure Analysis, 2018. **93**: p. 13-25.
26. Francis, D.K., et al., *Characterization and failure analysis of a polymeric clamp hanger component*. Engineering Failure Analysis, 2012. **26**: p. 230-239.
27. Corporation, M. 2016; Disponível em: <http://help.autodesk.com/view/MFIA/2016/ENU/>.
28. Autodesk. 2018; Disponível em: <http://help.autodesk.com/view/ACMPAN/2018/ENU/>.
29. HASCO®. *Bicos de Canal Quente*. 2019; Disponível em: <https://www.hasco.com/pt/Cat%C3%A1logo-do-produto/H/Bicos-de-canal-quente/c/PIM0401>.
30. Brayton L., Kenneth J. G., and J.F. B., *Mechanical Fastening of plastics. An Engineering Handbook*. New York: Marcel Dekker Inc., 1984.
31. *Weld lines and meld lines*. Santa Clara University.
Engineering Design Center: [Disponível em: http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/trouble/weldmeld/f6000001.htm].

Anexos

Anexo A

Tabela 10 - Espessura Mínima da Camada de plástico (adaptado de [12])

Diameter of Inserts (in.):	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1-1/4	1-1/2	1-3/4	2
phenolics:										
general-purpose	3/32	5/32	3/16	7/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16	15/32
medium-impact	5/64	9/64	5/32	13/64	9/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16
high-impact (rag)	1/16	1/8	9/64	3/16	1/4	9/32	5/16	11/32	3/8	13/32
high-impact (sisal)	5/64	9/64	5/32	3/16	1/4	9/32	5/16	11/32	3/8	13/32
high-impact (glass)	1/16	3/32	1/8	1/8	3/16	3/16	1/4	1/4	5/16	5/16
high-heat-resistant, general-purpose type	1/8	3/16	7/32	1/4	11/32	3/8	13/32	3/16	15/32	1/2
high-heat-resistant, impact type	5/64	9/64	5/32	13/64	9/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16
low-loss	5/32	7/32	1/4	9/32	3/8	13/32	7/16	15/32	1/2	17/32
special for large inserts	3/64	7/64	1/8	5/32	7/32	1/4	9/32	5/16	11/32	3/8
polyester, colors	3/32	5/32	3/16	7/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16	15/32
polyester, sisal-filled	5/64	9/64	5/32	3/16	1/4	9/32	5/16	11/32	3/8	13/32
polyester, glass-filled	1/16	1/8	9/64	3/16	1/4	9/32	5/16	11/32	3/8	13/32
diallyl phthalate:										
(a) "Orlon"-filled	1/8	3/16	7/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16	15/32	1/2
(b) mineral-filled	3/32	5/32	3/16	7/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16	15/32
(c) glass-filled	5/64	9/64	5/32	3/16	1/4	9/32	5/16	11/32	3/8	13/32
cellulose acetate	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1-1/4	1-1/2	1-3/4	2
cellulose acetate butyrate	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1-1/4	1-1/2	1-3/4	2
ethyl cellulose	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4	9/32	5/16	11/32
urea formaldehyde	3/32	5/32	3/16	7/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16	15/32
*melamine										
formaldehyde (a)	3/32	5/32	3/16	7/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16	15/32
(b)	1/8	3/16	7/32	5/16	11/32	3/8	13/32	7/16	15/32	1/2
vinylidene chloride resin	3/32	1/8	3/16	1/4	3/8	1/2	1/4	9/32	5/16	11/32
methyl methacrylate resin	3/32	1/8	3/16	3/16	7/32	1/4	5/8	3/4	7/8	1
polystyrene	3/16	3/8	9/16	3/4	1-1/8	1-1/2	1-7/8	2-1/4	2-5/8	3
polyethylene	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4	9/32	5/16	11/32
nylon:										
"Zydel" 101 or equiv.	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4	9/32	5/16	11/32
" 31 " "	3/32	1/8	5/32	7/32	1/4	5/16	11/32	13/32	7/16	15/32
" 63 " "	3/32	5/32	3/16	1/4	5/16	11/32	13/32	7/16	1/2	9/16
" 69 " "	1/8	7/32	9/32	11/32	7/16	1/2	19/32	21/32	23/32	13/16
" 105 " "	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4	9/32	5/16	11/32
" 211 " "	3/32	1/8	5/32	7/32	1/4	5/16	11/32	13/32	7/16	15/32
" 42 " "	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4	9/32	5/16	11/32
vinyl chloride-acetate resin	3/32	1/8	3/16	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1

* Melamine formaldehyde (a) mineral-filled melamine ignition material
(b) cellulose-filled melamine, electrical grade

Anexo B

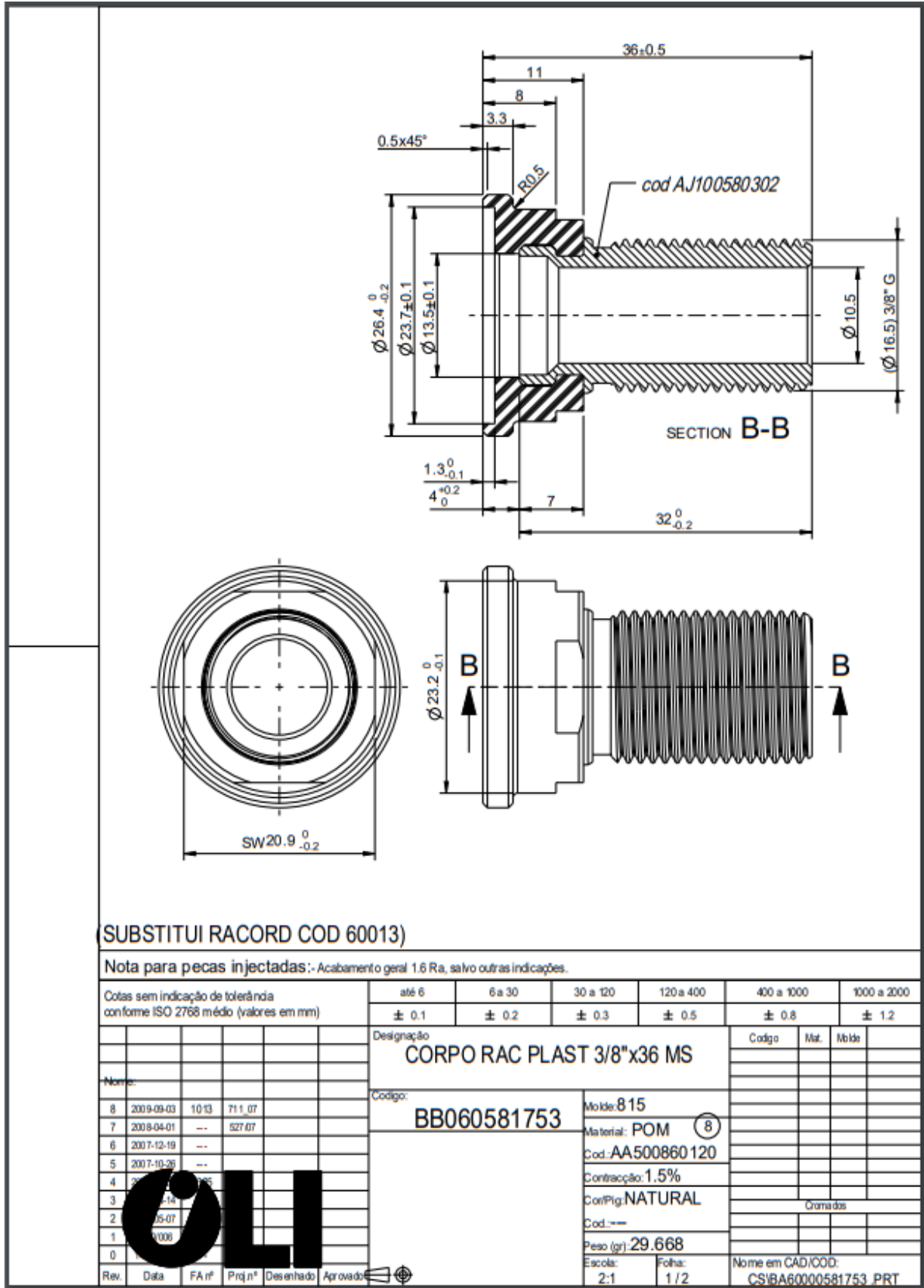


Figura 57 - Desenho Técnico (cortesia OLI - Sistemas Sanitários S.A)