



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Produção de Componentes para Moldes de Injeção
de Termoplásticos por Fabrico Aditivo Metálico***

João Miguel Oliveira Carreira

Leiria, setembro de 2019



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Produção De Componentes Para Moldes De
Injeção De Termoplásticos Por Fabrico Aditivo
Metálico***

João Miguel Oliveira Carreira

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Henrique de Amorim Almeida, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2019

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Imagination is more important than knowledge. For knowledge is limited, whereas imagination embraces the entire world, stimulating progress, giving birth to evolution.

Albert Einstein

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Primeiro quero agradecer ao Grupo Socem, em especial ao Renato Guerra, cujo apoio incansável no processo de fabricação aditiva foi fundamental para a elaboração deste projeto.

De seguida deixo um agradecimento aos meus orientadores de projeto, Doutor Joel Vasco e Doutor Henrique Almeida, pelo acompanhamento ao longo do projeto e na posterior revisão deste relatório.

Por fim, mas não por último, um profundo agradecimento à minha família e amigos pelo apoio incondicional. Mãe, Pai, Irmão, um muito obrigado, esta conquista é vossa. Nas palavras de Agostinho da Silva, que me transportam para algo dito certa vez pela minha Mãe, «*O que impede de saber não são nem o tempo nem a inteligência, mas somente a falta de curiosidade.*». Obrigado por tudo.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

As tecnologias de fabrico aditivo tornaram-se nos anos mais recentes a nova aposta a nível industrial, no entanto a utilização destas mantém-se sendo mais frequente na produção de peças isoladas e de baixo nível de produção, não sendo encaradas ainda como um método de fabrico apelativo à produção em série.

Este projeto vem explorar a capacidade deste tipo de tecnologias, especificamente a tecnologia de fabrico aditivo metálico conhecida por SLM, na produção de peças para gamas normalizadas tal como qualquer outra peça encontrada em catálogos de fornecedores.

Os componentes desenvolvidos neste projeto inserem-se na indústria de moldes e plásticos, indústria essa em franco crescimento e com bases sólidas no panorama nacional português, concretamente nas regiões da Marinha Grande e Oliveira de Azeméis.

De modo a desenvolver os componentes deste projeto foram utilizadas ferramentas de desenho, simulação e finalmente de processamento. Relativamente às ferramentas de simulação recorreu-se a *softwares* de simulação numérica por elementos finitos de modo a realizar análises estruturais dos componentes desenvolvidos tal como otimizações topológicas. Além disso foram realizadas simulações de enchimento recorrendo às características funcionais de um dos componentes deste projeto.

Com este projeto pretende-se demonstrar a aplicabilidade deste tipo de tecnologias na produção de certos componentes para este tipo de indústria quer a nível de capacidade de produção como a nível económico.

Palavras-chave: “Fabrico Aditivo Metálico”; “Moldes de Injeção de Termoplásticos”; “Otimização Topológica”; “Simulação Numérica de Enchimento”;

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

In recent years additive manufacturing technologies have become the new focus at industrial level, nevertheless their use is still more frequent in the production of isolated and low production parts and is not yet seen as an appealing production method to serial production.

This project exploits the capabilities of these technologies, specifically the metal additive manufacturing technology known as SLM, in producing standard range parts just like any other part found in a supplier catalog.

The components developed in this project are part of the injection molded plastics industry, a fast growing industry with solid bases in the portuguese national panorama, specifically in the regions of Marinha Grande and Oliveira de Azeméis.

In order to develop the components of this project were used drawing, simulation and finally processing tools. Regarding the simulation tools, were used finite element numerical simulation software to perform structural analysis of the developed components as well as topological optimizations. In addition, injection molding simulations were performed using the functional characteristics of one of the components of this project.

This project aims to demonstrate the applicability of this type of technologies in the production of certain components for this type of industry, both in terms of production capacity and economically.

Keywords: *“Metal Additive Manufacturing”*; *“Thermoplastic Injection Molding”*; *“Topological Optimization”*; *“Injection Molding Simulation”*;

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1: Lado A (à esquerda) e Lado B (à direita).	4
Figura 2: Ciclo de injeção “adaptado de (Goodship, 2004)“	5
Figura 3: Diagrama dos processos convencionais por arranque de apara utilizados na produção de componentes de moldes para injeção de termoplásticos (Kalpakjian e Schmid, 2009).	6
Figura 4: Custos genéricos de produção de um molde de injeção de termoplásticos “adaptado de (Böhler, 2016)“	7
Figura 5: Representação esquemática em vista de corte de refrigeração perto do bico de injeção “adaptado de (Günther, 2019)“	8
Figura 6: Representação esquemática em 3D (à esquerda) e corte transversal (à direita) dos parâmetros a respeitar durante o projeto dos canais de refrigeração	8
Figura 7: Diagrama das tecnologias de fabrico aditivo metálico “adaptado de (ADDISPACE, 2017)“	10
Figura 8: Funcionamento genérico dos processos de deposição direta de energia “adaptado de (T.Srivatsan, Manigandan e T.Sudarshan, 2015)“	11
Figura 9: Esquema de um sistema LENS® “adaptado de (Gu, 2015)“	12
Figura 10: Esquema do funcionamento do BPM “adaptado de (Varotsis, 2019)“	13
Figura 11: Esquema do funcionamento do processo de SLM “adaptado de (CustomPartNet, 2019)“	15
Figura 12: Esquemática do processo de EBM “adaptado de (ADDISPACE, 2017)“	16
Figura 13: Representação esquemática do processo de <i>cold spray</i> “adaptado de (Jodoin, Gartner e Irissou, 2016)“	17
Figura 14: Curva genérica de tensão vs. deformação para materiais dúcteis (Beer e Johnston, 2006).	18
Figura 15: Critério de Tresca para o estado plano de tensões (Beer e Johnston, 2006).	19
Figura 16: Critério de von Mises para o estado plano de tensões (Beer e Johnston, 2006).	19
Figura 17: Otimização topológica em 2D (Sigmund e Bendso, 2003).	22

Figura 18: Conceito de otimização topológica de um braço de controlo de suspensão (Sigmund e Bendsø, 2003).....	22
Figura 19: Representação genérica de um circuito convencional (a) e um circuito conformável (b).	24
Figura 20: Representação esquemática em 3D (à esquerda) e corte transversal (à direita) dos parâmetros a respeitar durante o projeto dos canais de refrigeração conformáveis.	25
Figura 21: Representação em corte do preliminar do componente.	29
Figura 22: Conceito inicial do inserto de injeção do tipo “banana”.	30
Figura 23: ProX® DMP 300 (3DSystems, 2017).....	31
Figura 24: Pós metálicos e seus riscos para a saúde e de combustão ou explosão “adaptado de (3DSystems, 2017) “.	33
Figura 25: Fluxograma do desenvolvimento dos componentes.....	36
Figura 26: Secção 2D do inserto.....	38
Figura 27: Linhas do modelo 3D da refrigeração de canais conformáveis.	39
Figura 28: Canais de refrigeração conformáveis em 3D.	39
Figura 29: Casquilho refrigerado.	40
Figura 30: Tabela de entrada de parâmetros do componente no <i>software</i> TopSolid 7®.	43
Figura 31: Seleção e inserção do componente no <i>software</i> CAD TopSolid 7®.....	44
Figura 32: 2D do modelo original do componente para a referência ST12/26.....	45
Figura 33: Aplicação de pressão em (a) e constrangimento de fixação em (b).	49
Figura 34: Tensões obtidas pelo critério de von Mises.	50
Figura 35: Deslocamento total.	50
Figura 36: Deslocamento total com pormenorização dos canais de refrigeração.....	51
Figura 37: Zonas protegidas durante a simulação de otimização topológica assinaladas a vermelho.	51
Figura 38: Conceito do modelo otimizado da peça (a) e sobreposição do conceito do modelo otimizado com a peça original (b) com uma redução de massa de 35%.....	52
Figura 39: Conceito do modelo otimizado da peça (a) e sobreposição do conceito do modelo otimizado com a peça original (b) com uma redução de massa de 50%.....	53
Figura 40: Conceito do modelo otimizado da peça (a) e sobreposição do conceito do modelo otimizado com a peça original (b) com uma redução de massa de 75%.....	53

Figura 41: Vista de topo do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 75% (c).....	54
Figura 42: Vista lateral do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 75% (c).....	54
Figura 43: Vistas do 3D do conceito de design otimizado gerado com uma redução de massa de 75%.....	54
Figura 44: Vista isométrica do 3D do casquilho refrigerado otimizado.....	55
Figura 45: Vista de topo e lateral do 3D do casquilho refrigerado otimizado.....	55
Figura 46: Modelo Híbrido Topologicamente Otimizado.....	56
Figura 47: Composição convencional de uma refrigeração de um bico de injeção... 57	57
Figura 48: Exemplo genérico de aplicação do casquilho refrigerado.....	57
Figura 49: Refrigeração convencional do local de injeção.....	58
Figura 50: Utilização do componente desenvolvido.....	58
Figura 51: Definição de parâmetros do canal de injeção.....	60
Figura 52: Definição da secção do canal de alimentação frio.....	61
Figura 53: Definição de parâmetros finais do jito frio.....	61
Figura 54: Definição do ponto de injeção de secção circular.....	63
Figura 55: Definição do ponto de injeção de secção elipsoidal.....	64
Figura 56: Componente “inserto de injeção” completamente parametrizado.....	65
Figura 57: Tabela de dados do inserto de injeção do tipo “banana” no <i>software</i> TopSolid 7®.....	66
Figura 58: Inserção do modelo 3D do inserto de injeção no TopSolid 7®.....	66
Figura 59: Tensões obtidas pelo critério de von Mises.....	68
Figura 60: Deslocamento total.....	69
Figura 61: Deslocamento total com pormenorização do canal de injeção.....	69
Figura 62: Zonas protegidas durante a simulação de otimização topológica assinaladas a vermelho.....	70
Figura 63: Conceito do modelo otimizado da peça com uma redução de massa de 35%.	71
Figura 64: Conceito do modelo otimizado da peça com uma redução de massa de 50%.	71
Figura 65: Conceito do modelo otimizado da peça com uma redução de massa de 65%.	72

Figura 66: Vista pormenorizada da curva do canal de injeção do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 65% (c).....	72
Figura 67: Vista isométrica do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 65% (c).....	73
Figura 68: Material removido do componente assinalado a vermelho.....	73
Figura 69: Modelo topologicamente otimizado do inserto de injeção.....	74
Figura 70: Vistas laterais do modelo híbrido original (à esquerda) e modelo híbrido topologicamente otimizado (à direita).....	74
Figura 71: Vista isométrica do modelo híbrido topologicamente otimizado.....	75
Figura 72: Exemplo de montagem do inserto de injeção MTO.....	75
Figura 73: Disposição da peça e dos suportes no prato de construção.	76
Figura 74: Representação do ST15/26 MTO para produção.	77
Figura 75: Início do processo SLM;	77
Figura 76: Processamento do casquilho refrigerado.....	78
Figura 77: Vista isométrica do lado da injeção do molde em estudo.	81
Figura 78: Linhas de refrigeração (a azul) e canal do bico de injeção (a vermelho). 82	
Figura 79: Resultado de tempo de extração obtido para solução de refrigeração convencional.....	85
Figura 80: Resultado de tempo de extração obtido para solução de refrigeração com canais conformáveis.	85
Figura 81: Resultado obtido do fluxo de calor para o circuito conformável.	86
Figura 82: Desempenho do método convencional vs. método conformável.	87
Figura 83: Fluxograma para identificação da necessidade do casquilho desenvolvido.	88
Figura 84: Utilização da potência do laser ao longo do processamento.	93
Figura 85: Custos anuais fixos, energéticos, manutenção/reparação e com pessoal. 94	
Figura 86: Tempo total de fabrico unitário dos vários modelos desenvolvidos para ambos componentes.	98
Figura 87: Custos totais de fabrico (custo de matéria-prima + custo de máquina) para cada modelo desenvolvido de cada componente e valores de aquisição para componentes equivalentes existentes no mercado.	99
Figura 88: Vantagens da utilização de otimização topológica combinada com a metodologia híbrida no fabrico aditivo.	102

Lista de tabelas

Tabela 1: Parâmetros a respeitar durante o projeto dos canais de refrigeração (Granja et al., 2006).	8
Tabela 2: Parâmetros a selecionar para a construção de um circuito de refrigeração conformável (Mayer, 2009), (As, van et al., 2017).	24
Tabela 3: Características da ProX® DMP300.	31
Tabela 4: Propriedades gerais dos pós selecionados comercializados pela 3D Systems®	32
Tabela 5: Parâmetros relativos ao casquilho refrigerado.	41
Tabela 6: Parâmetros relativos ao circuito de refrigeração.	42
Tabela 7: Distância entre furos real e mínima aconselhada.	43
Tabela 8: Índices de desempenho obtidos.	48
Tabela 9: Propriedades mecânicas do <i>LaserForm® Maraging Steel (B)</i>	48
Tabela 10: Parâmetros de entrada das dimensões do corpo do inserto de injeção.	60
Tabela 11: Valores de diâmetro hidráulico para as diferentes referências de canal de alimentação frio.	62
Tabela 12: Parâmetros de entrada para definição do diâmetro de injeção efetivo de secção circular.	63
Tabela 13: Parâmetros de entrada para definição do diâmetro de injeção efetivo de secção elipsoidal.	64
Tabela 14: Informação inicial para o estudo de enchimento.	82
Tabela 15: Parâmetros de injeção e de compactação.	83
Tabela 16: Parâmetros da refrigeração do molde.	83
Tabela 17: Valores obtidos de <i>sealing time</i> , <i>freezing time</i> e <i>ejection time</i> dos três estudos realizados.	84
Tabela 18: Valores obtidos de eficiência para os dois estudos com refrigeração.	86
Tabela 19: Resultados de refrigeração obtidos no estudo.	86
Tabela 20: Tempos médios registados para <i>setup</i> da máquina, processamento e troca de peça.	89
Tabela 21: Custos fixos da máquina de SLM.	91
Tabela 22: Volume processado e redução volumétrica dos diferentes modelos desenvolvidos para ambos componentes.	97

Tabela 23: Valores obtidos para os tempos de fabrico dos diferentes modelos desenvolvidos para ambos componentes.....	97
---	----

Lista de siglas

2D - Duas Dimensões

3D - Três Dimensões

3DP - *Three-dimensional Printing*

AM - *Additive Manufacturing*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BPM - *Ballistic Particle Manufacturing*

CAD - *Computer Aided Design*

CAE - *Computer Aided Engineering*

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

CNC - *Computer Numerical Control*

DFM - *Design for Manufacturing*

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

DLF - *Directed Light Fabrication*

DMD - *Direct Metal Deposition*

DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*

DMP - *Direct Metal Printing*

EBAM - *Electron Beam Additive Manufacturing*

EBM - *Electron Beam Melting*

EU - *European Union*

FEA - *Finite Element Analysis*

GMAW- *Gas Metal Arc Welding*

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

HDT - *Heat Deflection Temperature*

HRB - *Hardness Rockwell B*

HRC - *Hardness Rockwell C*

ISO - *International Organization for Standardization*

LBM - *Laser Beam Melting*

LBM-w - *Laser Beam Melting-wire*

LENS - *Laser Engineered Net Shaping*

LMD - *Laser Metal Deposition*

MAG - *Metal Active Gas*

MHO - *Modelo Híbrido Original*

MHTO - *Modelo Híbrido Topologicamente Otimizado*

MIG - *Metal Inert Gas*

MIT - *Massachusetts Institute of Technology*

MO - *Modelo Original*

MTO - *Modelo Topologicamente Otimizado*

PAW - *Plasma Arc Welding*

PH - *Precipitation Hardening*

PP - *Polipropileno*

SEBM- *Selective Electron Beam Melting*

SLM - *Selective Laser Melting*

TIG - *Tungsten Inert Gas*

US - *United States of America*

WAAM - *Wire and Arc Additive Manufacturing*

Índice

ORIGINALIDADE E DIREITOS DE AUTOR	V
AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE SIGLAS	XIX
ÍNDICE	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Estrutura do projeto	2
2. ESTADO DE ARTE	3
2.1. Moldes de injeção de termoplásticos	3
2.1.1. Breve definição	3
2.1.2. Constituição de um molde de injeção de termoplásticos	3
2.1.3. Processo de injeção	4
2.1.4. Processos de fabricação convencionais utilizados na indústria dos moldes	5
2.1.5. Metodologia de <i>design</i> convencional - Refrigeração	7
2.2. Processos aditivos metálicos	9
2.2.1. Deposição direta de energia	10
2.2.2. Modelação direta por laser (LENS®)	12
2.2.3. Impressão 3D de aglomerante (<i>binder jetting</i>) - 3DP/BPM	12
2.2.4. Processos de fusão seletiva em camada de pó (SLM e EBM)	14

2.2.5.	Projeção de pó	17
2.3.	Simulação numérica por elementos finitos	18
2.3.1.	Análise estrutural	18
2.3.2.	Simulação numérica do enchimento	20
2.3.3.	Otimização topológica	21
2.4.	Design para fabrico aditivo	23
2.4.1.	Conceção dos canais conformáveis	23
3.	CASOS DE ESTUDO – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	27
3.1.	Casquilho refrigerado	27
3.2.	Inserto de injeção	29
3.3.	Equipamento	30
3.4.	Material processado	32
3.5.	Segurança	33
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
4.1.	Desenvolvimento do casquilho refrigerado	37
4.1.1.	Parametrização	37
4.1.2.	Seleção do material	46
4.1.3.	Análise estrutural	48
4.1.4.	Otimização topológica	51
4.1.5.	Montagem do componente	56
4.2.	Desenvolvimento do inserto de injeção “banana”	59
4.2.1.	Parametrização	59
4.2.2.	Seleção do material	67
4.2.3.	Análise estrutural	67
4.2.4.	Otimização topológica	70
4.2.5.	Montagem do componente	75
4.3.	Produção dos componentes	76

5.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	81
5.1.	Impacto no tempo de extração	81
5.2.	Análise de tempos e custos de fabrico	89
5.2.1.	Modelo de custo – Custos de máquina	90
5.2.2.	Modelo de custo – Custos por peça	94
5.2.3.	Cálculo dos custos	96
6.	CONCLUSÃO	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXOS	109
	Anexo I – Desenho 2D do C ST15/26 MHTO	110
	Anexo II – Desenho 2D do IB ST23/25 MHTO	111
	Anexo III - Ficha técnica do LaserForm® Maraging Steel (B)	112
	Anexo IV – Ficha técnica do PP Hifax CB 1158 G	113
	Anexo V – Relatório DMP do C ST15/26 MO	114
	Anexo VI – Relatório DMP do C ST15/26 MTO	115
	Anexo VII – Relatório DMP do C ST15/26 MHO	116
	Anexo VIII – Relatório DMP do C ST15/26 MHTO	117
	Anexo IX – Relatório DMP do IB ST30/40 MO	118
	Anexo X – Relatório DMP do IB ST30/40 MTO	119
	Anexo XI – Relatório DMP do IB ST30/40 MHO	120
	Anexo XII – Relatório DMP do IB ST30/40 MHTO	121

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

A utilização de tecnologias de fabrico aditivo no sector dos moldes de injeção para termoplásticos tem vindo a ser cada vez mais recorrente desde os anos 90 com a criação do conceito da refrigeração com canais conformáveis (Sachs *et al.*, 1995), desde então têm-se desenvolvido aplicações com este tipo de característica.

1.1. Enquadramento e motivação

Com o aumento da utilização das tecnologias de fabrico aditivo no panorama industrial e com as evoluções tecnológicas a nível de equipamento e dos materiais processados neste tipo de tecnologias, é notório que dentro dos próximos anos irá ocorrer um crescimento exponencial da utilização destas tecnologias no setor industrial.

Deste modo é bastante claro que a necessidade de técnicos e engenheiros com conhecimentos nesta área irá surgir muito em breve e as empresas que queiram manter-se e/ou tornar-se competitivas no mercado mundial terão de se adaptar e ganhar *know-how* em tecnologias de automação, robótica e fabrico aditivo (também conhecido por fabrico digital).

Com este projeto pretende-se provar que as tecnologias de fabrico aditivo metálico podem ter um papel preponderante na produção de moldes para injeção de termoplásticos, alargando o leque de opções que se podem tomar aquando da definição do projeto de molde de modo a revolucionar a metodologia de *design for manufacturing* (DFM) na produção dos moldes.

Já recorrentemente utilizadas na fabricação de insertos com refrigeração de canais conformáveis pretende-se estudar a fabricação de outro tipo de componentes e avaliar o seu comportamento a nível de desempenho e custos de fabricação. Pretende-se com tal provar a competitividade em termos de tempo e custos de fabrico destes mesmos componentes tal como criar novas características estruturais que adicionem mais-valias ao produto.

1.2. Estrutura do projeto

Numa primeira parte será apresentado o Estado de Arte a nível dos moldes de injeção de termoplásticos. Será realizada uma breve definição do que é um molde de injeção de termoplásticos, o seu fabrico e o processo de injeção.

Ainda no Estado de Arte foi elaborada uma síntese das tecnologias de fabrico aditivo metálico que possam ser mais relevantes e uma breve descrição dos tipos de simulação numérica por elementos finitos que serão utilizados recorrentemente ao longo do projeto.

Finalmente é feito um escrutínio à informação sobre *Design* para Fabrico Aditivo Metálico recolhida de uma diversidade de fontes e que foi utilizada posteriormente no desenvolvimento dos componentes deste projeto.

É ainda realizada uma análise ao equipamento utilizado neste projeto a nível do material possível de ser processado e ao nível das medidas de precaução e segurança necessárias para a utilização do equipamento.

A componente experimental resume-se no desenvolvimento de dois casos de estudo, mais especificamente dois componentes utilizados no projeto de um molde de injeção de termoplásticos. Para cada componente foi realizado um desenho preliminar, seguido de seleção de material, análise estrutural recorrendo a *software* CAE e otimização topológica do mesmo, recorrendo também a simulação numérica. Foram realizadas ainda para um dos componentes simulações numéricas de enchimento, de modo a validar os circuitos de refrigeração desenvolvidos, e foi analisado o método de montagem de cada um dos componentes. Finalmente seguiu-se o processamento do componente por fusão seletiva por laser, tendo todo o processo de fabrico tido lugar nas instalações da Socem Impact.

A recolha dos dados das simulações de enchimento permitiu a realização da análise quanto ao efeito da refrigeração desenvolvida para o primeiro componente relativamente ao tempo de ciclo de uma peça plástica. Para os componentes desenvolvidos realizou-se uma análise dos tempos e custos de fabrico.

2. Estado de Arte

2.1. Moldes de injeção de termoplásticos

2.1.1. Breve definição

Um molde de injeção de termoplásticos é uma ferramenta mecânica, ferramenta esta que quando acoplada a uma máquina de injeção de termoplásticos permite a produção de peças plásticas, sendo estas o produto final que se pretende obter. A sua construção irá ter implicações diretas no produto final, a nível físico, estético e ainda ao nível do custo de produção por peça.

2.1.2. Constituição de um molde de injeção de termoplásticos

Na sua constituição mais simples o molde (Figura 1) é formado apenas por uma cavidade no lado A (lado fixo) e por uma bucha e sistema de extração simples no lado B (lado móvel), enquanto em moldes para peças mais complexas este pode possuir sistemas de extração com mecânicas complexas como também sistemas de injeção de canais quentes para a produção de peças com um ou mais materiais distintos, chamados estes moldes multimaterial. Na sua maioria o material injetado é um polímero, sendo que em moldes multimateriais existe um segundo material, injetado em último, normalmente um elastómero.

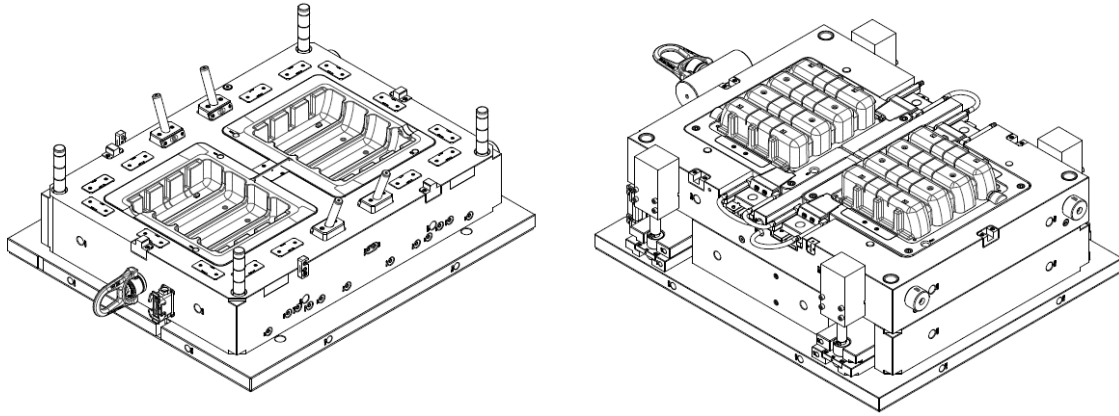


Figura 1: Lado A (à esquerda) e Lado B (à direita).

2.1.3. Processo de injeção

O processo de injeção resume-se ao aquecimento do material polimérico através de resistências elétricas e da própria fricção do material injetado resultante da rotação do fuso no cilindro de plasticização da máquina de injeção, onde este irá amolecer e homogeneizar. Este material fundido irá então fluir sob uma determinada pressão para o interior do molde, e preencher então a cavidade para onde flui, arrefecendo este devido às trocas de calor com a superfície moldante, até que ao atingir a temperatura de extração do material a peça injetada irá ser extraída por meios mecânicos, pneumáticos, elétricos e/ou sucção (robotizados) levando então a máquina de injeção a preparar-se para um novo ciclo de injeção (Granja *et al.*, 2006), (Crawford, 1998).

Na Figura 2 está representado esquematicamente o ciclo de injeção de uma peça plástica. De notar que cerca de 50% do tempo de ciclo (Goodship, 2004) é dado como sendo o arrefecimento necessário da peça, embora alguns autores refiram que este tempo pode chegar até 80% do tempo de ciclo (Rosato, 2000). Nota-se então a importância do tempo de refrigeração no tempo de ciclo de uma peça produzida por este método, perfazendo este a maior parte do tempo de ciclo.



Figura 2: Ciclo de injeção “adaptado de (Goodship, 2004)”.

De todas as variáveis o arrefecimento pode ser considerado o parâmetro do tempo de ciclo que é mais influenciado pelo projeto do molde, sendo que uma aplicação adequada dos circuitos e componentes de refrigeração, tal como cascatas, pinos térmicos, entre outros, irá reduzir significativamente o tempo de arrefecimento e consequentemente o tempo de ciclo da peça plástica, tendo tal uma implicação direta nos custos de produção, sendo então esta uma variável com grande interesse em otimizar.

2.1.4. Processos de fabricação convencionais utilizados na indústria dos moldes

Nesta indústria são utilizadas na quase totalidade dos casos tecnologias subtrativas, onde se parte de um bloco de material metálico, geralmente aço, com dimensões superiores às dimensões máximas da peça pretendida, de modo a que se possam efetuar uma série de operações de desbaste e acabamento posterior. Essas tecnologias, consideradas como processos de corte por arranque de apara, podem ser classificadas pelo tipo de apara que produzem (Figura 3).

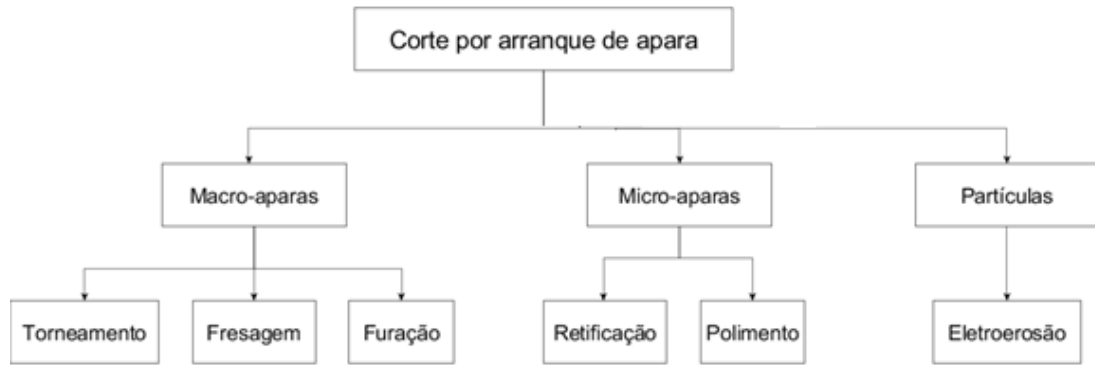


Figura 3: Diagrama dos processos convencionais por arranque de avara utilizados na produção de componentes de moldes para injeção de termoplásticos (Kalpakjian e Schmid, 2009).

De uma forma geral, na indústria dos moldes, peças de revolução irão sofrer operações de torneamento, enquanto peças com outros formatos irão sofrer operações de fresagem, mais adequadas à sua geometria, podendo ambas sofrer retificação ou polimento dependendo da aplicação final.

Eletroerosão por fio ou eletroerosão por penetração são métodos de fabrico geralmente utilizados quando se pretende obter geometrias de grande precisão e que são difíceis de obter por outros métodos convencionais.

Os custos de fabrico associados a estes processos são elevados sendo necessário um operador para a produção de cada peça, sendo também necessário um programador de CAM no caso da produção ser feita por máquinas CNC ou eletroerosão por fio e/ou por penetração. Para além de todos os custos associados ao referido anteriormente é necessário contabilizar os custos energéticos e de ferramentas/consumíveis, para além do custo da própria máquina, sendo estes consideravelmente elevados.

Todos os processos acima referidos introduzem tensões residuais térmicas no material processado, geralmente aço, sendo que após o processo de fabrico é aconselhado um tratamento térmico de redução de tensões, tal acarreta mais custos para o componente.

De uma forma genérica os custos de produção associados aos moldes de injeção de termoplásticos podem ser representados percentualmente como apresentado na Figura 4. De referir que a maior fatia dos custos está associada à maquinação do molde e dos seus constituintes, cerca de 75% do custo global.

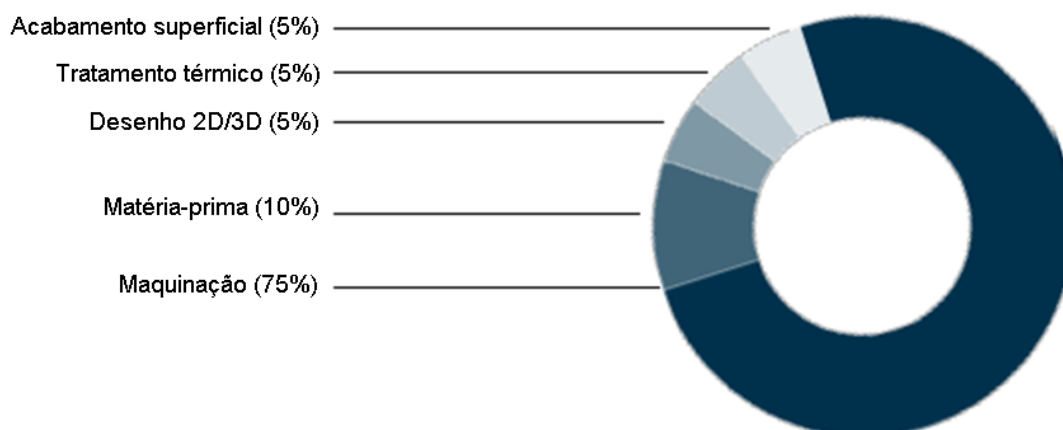


Figura 4: Custos genéricos de produção de um molde de injeção de termoplásticos “adaptado de (Böhler, 2016)“.

2.1.5. Metodologia de *design* convencional - Refrigeração

De modo a obter uma refrigeração eficiente no molde de injeção é necessário respeitar alguns princípios básicos (Granja *et al.*, 2006). Estes podem ser resumidos da seguinte forma:

- Colocar os canais de refrigeração a uma distância adequada e o mais constante possível da superfície da cavidade;
- Utilizar diâmetros adequados para os canais de refrigeração;
- Refrigerar na cavidade/bucha e respetivos insertos moldantes;
- Utilizar um fluido refrigerante composto por água destilada (ou óleo para temperaturas > 140 °C) e um aditivo (25-65 %) com resistência à corrosão de modo a não criar depósitos de material.

Whelan (Whelan e Goff, 1990) dá especial importância ao arrefecimento da área circundante ao bico de injeção do molde pois este está diretamente relacionado com o comprimento de fluxo do material a injetar. O controlo da temperatura do bico de injeção é crucial para obter os melhores resultados ao nível da injeção. Para tal é colocado um circuito individual na cavidade para fazer o arrefecimento do bico de injeção e é aconselhado colocar uma cascata de refrigeração do lado oposto ao do bico de injeção (Figura 5), na bucha.

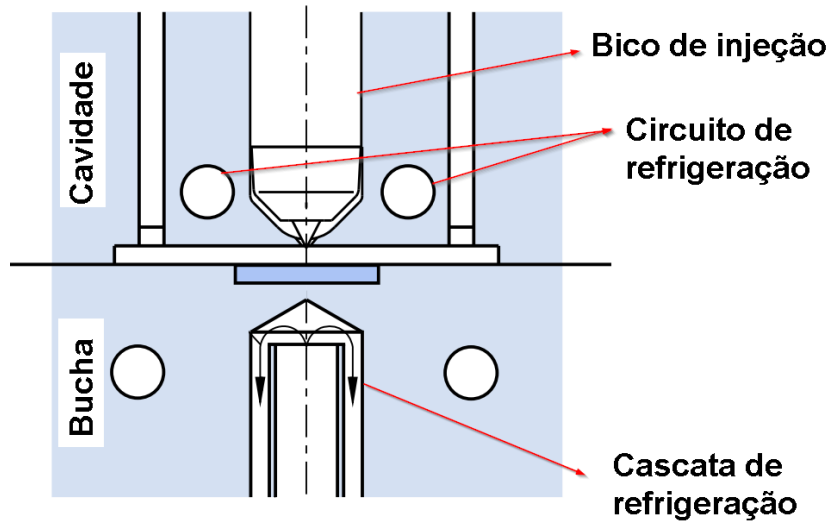


Figura 5: Representação esquemática em vista de corte de refrigeração perto do bico de injeção “adaptado de (Günther, 2019)“.

De acordo com o Manual do Projetista (Granja *et al.*, 2006) e o Manual de Boas Práticas da Indústria de Moldes (Cefamol, 2006), devem ser respeitadas normas relativas à refrigeração das zonas moldantes, tal como representado na Figura 6 e complementado com a Tabela 1.

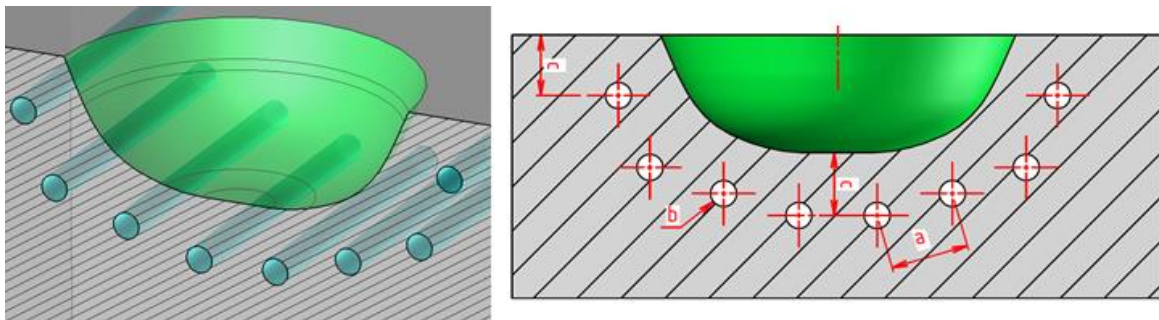


Figura 6: Representação esquemática em 3D (à esquerda) e corte transversal (à direita) dos parâmetros a respeitar durante o projeto dos canais de refrigeração

Tabela 1: Parâmetros a respeitar durante o projeto dos canais de refrigeração (Granja *et al.*, 2006).

Espessura de parede da peça a injetar [mm]	Ø Canal (b) [mm]	Distância entre centros dos furos (a) [mm]	Distância entre centro dos furos e cavidade (c) [mm]
< 2	6 - 10	[2.5 ; 3] * b	[0.8 ; 1.5] * a
2 - 4	10 - 12	[2.5 ; 3] * b	[0.8 ; 1.5] * a
4 - 6	12 - 15	[2.5 ; 3] * b	[0.8 ; 1.5] * a

2.2. Processos aditivos metálicos

Os processos de fabrico aditivo surgem pela primeira vez em 1952 como um conceito, sendo que apenas tomam forma em 1984 com a primeira patente de estereolitografia. A partir da década de 90 os processos aditivos começam a ser cada vez mais utilizados ao nível da prototipagem, sendo que nos anos mais recentes pode-se considerar os processos de fabrico aditivo, em especial os metálicos, como uma tecnologia capaz de produzir componentes em série (ADDISPACE, 2017).

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2015 (ISO/ASTM, 2015), fabrico aditivo pode ser definido por «*Process of joining materials to make parts from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies*», ou seja, processo de união de materiais para criação de peças a partir de modelos de CAD 3D, geralmente camada sobre camada, ao contrário das metodologias de fabricação subtrativas e das metodologias de fabricação “formativas”.

De acordo com a norma anterior existem sete categorias de processos aditivos, sendo elas (ISO/ASTM, 2015):

- Impressão de aglomerante;
- Deposição direcionada de energia;
- Extrusão de material;
- Impressão de material;
- Fusão em camada de pó;
- Laminação em folhas;
- Fotopolimerização em câmara.

Das sete categorias referidas anteriormente nem todas incluem processos de fabrico aditivo metálico. Assim, com enfoque nas tecnologias de fabrico aditivo metálico, realizou-se uma separação destas tecnologias tendo por base o formato da matéria-prima e por modo de deposição (Figura 7).

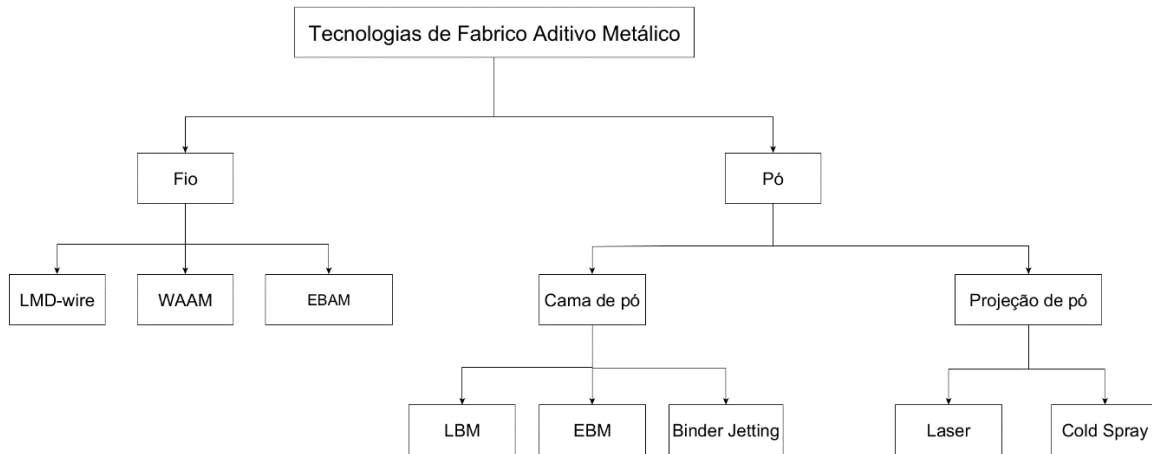


Figura 7: Diagrama das tecnologias de fabrico aditivo metálico “adaptado de (ADDISPACE, 2017)“.

2.2.1. Deposição direta de energia

Sendo das metodologias de fabrico aditivo mais antigas, tendo a primeira patente deste tipo de tecnologia sido registada em 1925, as tecnologias de fabrico aditivo por deposição direta de energia (*directed energy deposition*), recorrem a um fio metálico invés de pó, sendo que estas encontram-se nas tecnologias mais utilizadas devido à facilidade de conceção de peças e facilidade em adaptar tecnologias já existentes de soldadura a outras já existentes tais como braços robotizados (T.Srivatsan, Manigandan e T.Sudarshan, 2015).

Na tecnologia por fio, o seu funcionamento é bastante semelhante ao de uma soldadura, onde o fio metálico, é fundido por uma fonte de calor à medida que o fio é alimentado. Esta pode ser um arco elétrico (WAAM), um feixe laser (LMD-wire) ou ainda um feixe de eletrões (EBAMTM) (ADDISPACE, 2017).

O ambiente de construção utilizado também terá necessariamente de ser diferente para cada um destes tipos de tecnologia. Para os processos WAAM o ambiente será uma atmosfera de gás inerte enquanto para os processos de laser e EBAMTM o ambiente de construção deverá ser de baixo vácuo.

O funcionamento desta metodologia pode ser descrito pela Figura 8, sendo que o processo é semelhante para as várias tecnologias, variando a fonte de calor, a fonte de energia e a atmosfera de construção.

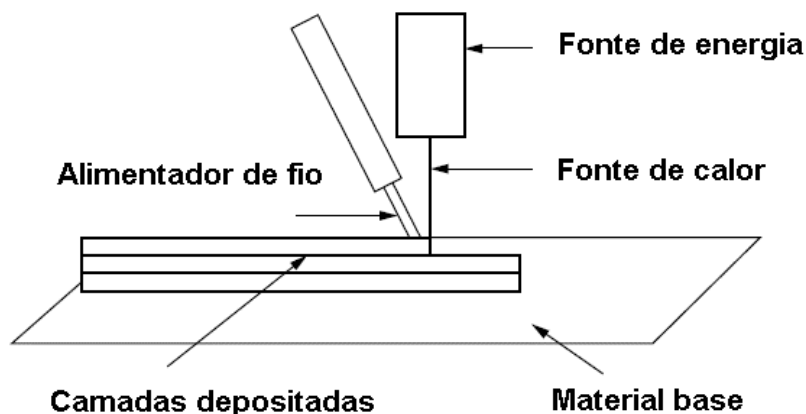


Figura 8: Funcionamento genérico dos processos de deposição direta de energia “adaptado de (T.Srivatsan, Manigandan e T.Sudarshan, 2015)”.

Dentro da tecnologia WAAM utilizam-se diferentes tecnologias de arco elétrico, sendo elas (ADDISPACE, 2017):

- GTAW ou TIG;
- GMAW;
- PAW.

Dentro dos processos referidos anteriormente, o mais utilizado é o GMAW (MIG/MAG), mais concretamente o processo de MIG, devido a recorrer a um gás inerte no seu funcionamento. Este processo possui muitas vantagens a nível económico. O processo é de custo muito baixo comparativamente a outros processos aditivos, depende da adaptação de maquinaria já existente o que implica uma arquitetura aberta. Qualquer *software* pode ser adaptado ao processo e a fonte de alimentação e manipulador não possuem qualquer restrição a nível de fornecedor, o que diminui em muito o custo de aquisição e o custo da matéria-prima (fio metálico) é muito menor comparativamente ao pó.

A níveis produtivos existem vantagens interessantes. A taxa de deposição de material é muito elevada e não existe concretamente um limite dimensional para as peças a serem produzidas por este método.

As maiores desvantagens deste processo que afastam a consideração da sua utilização na maioria das aplicações tratam-se da reduzida precisão de construção, sendo visível a olho nu, o efeito escada na construção das peças, a existência de uma rugosidade bastante acentuada na superfície das peças e as elevadas tensões residuais e distorções que comprometem as tolerâncias das peças (ADDISPACE, 2017).

2.2.2. Modelação direta por laser (LENS®)

LENS®, DMD e DLF são as três tecnologias de modelação direta por laser existentes no mercado, sendo também conhecidas por LMD. Esta tecnologia (Figura 9) inicialmente desenvolvida nos laboratórios da Sandia National®, foi introduzida pela primeira vez no mercado em 1997 pela Optomec® um sistema de AM que utiliza esta tecnologia.

Estes processos de fusão de pós metálicos atuam através de um feixe de laser e de dois bicos dispensadores de pó, que pressurizam o pó para o laser, este ao entrar em contacto com o laser é fundido de imediato. Tal como outras tecnologias laser este processo funciona camada a camada (Gu, 2015).

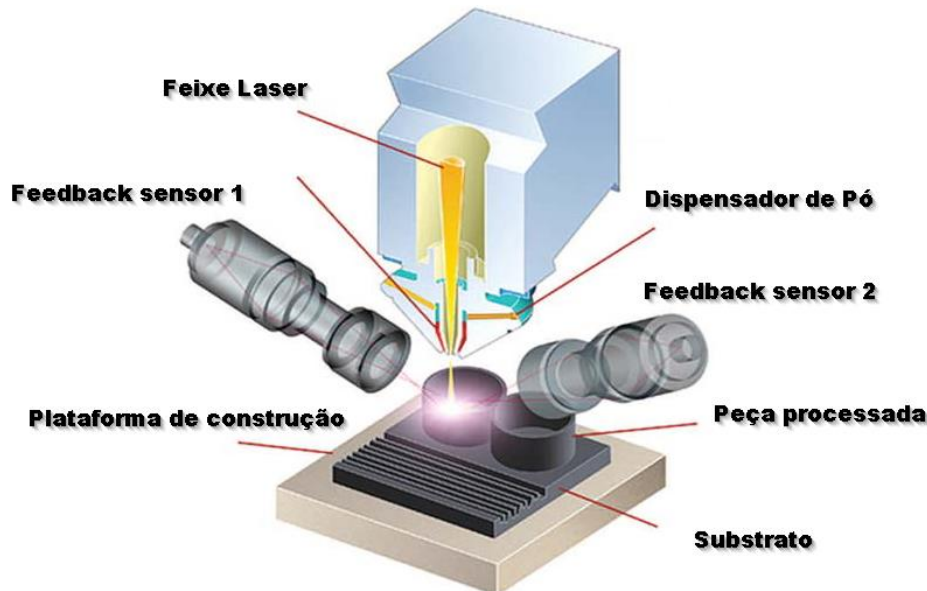


Figura 9: Esquema de um sistema LENS® “adaptado de (Gu, 2015)“.

2.2.3. Impressão 3D de aglomerante (*binder jetting*) - 3DP/BPM

O processo designado por impressão 3D de aglomerante ou *binder jetting* foi desenvolvido inicialmente em 1993 no MIT, tendo sido posteriormente iniciada a sua exploração comercial por uma série de empresas (T.Srivatsan, Manigandan e T.Sudarshan, 2015).

Neste processo (Figura 10) as partículas de pó são distribuídas por uma lâmina ou pá niveladora numa cama de pó onde após a aplicação do aglomerante estas se agregam umas às outras, camada após camada. À medida que as camadas são depositadas os pó que até então não receberam o aglomerante são removidos. Esta tecnologia é capaz de processar materiais cerâmicos e metais (Varotsis, 2019), (ExOne, 2019).

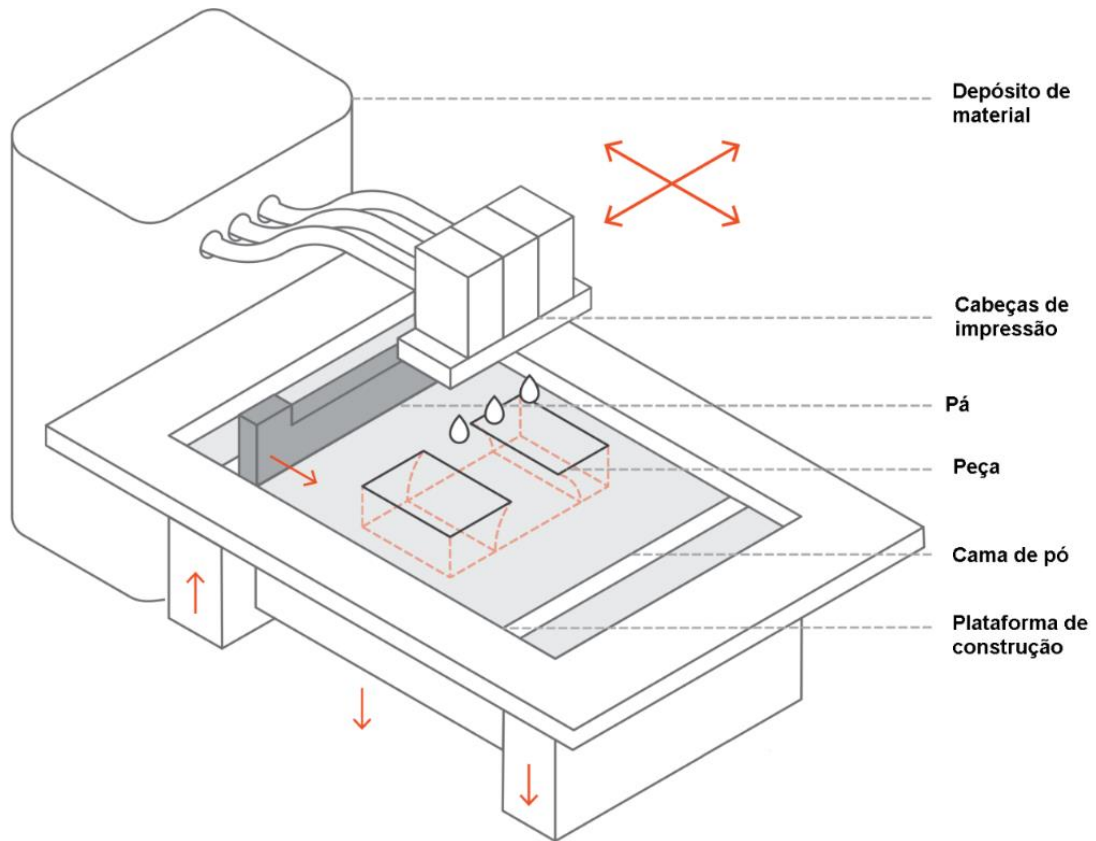


Figura 10: Esquema do funcionamento do BPM “adaptado de (Varotsis, 2019)“.

Após o processamento de metais é necessário efetuar um tratamento térmico ou adicionar um metal de considerável menor ponto de fusão relativamente ao material base, de modo a reforçar a resistência da agregação (ExOne, 2019).

2.2.4. Processos de fusão seletiva em camada de pó (SLM e EBM)

Dentro dos processos de fusão seletiva de metais em camada de pó existem duas tecnologias cuja metodologia é muito semelhante, são elas os processos de SLM e de EBM.

SLM é considerado um processo de fusão seletiva de metais em camada de pó que dependendo do fabricante do equipamento pode ser chamado de *Laser Forming*, LBM, *Laser Cusing* ou DMLS.

Na fusão seletiva por feixe laser (Figura 11), esta consiste na construção camada a camada de uma peça metálica recorrendo à ação de um ou mais feixes laser de elevada potência que varrem uma cama de pó, fundindo o pó na totalidade. Este processo utiliza um *re-coater*, em formato de rolo ou lâmina niveladora, para depositar a camada de pó, tal combinado com a fina granulometria que os pós utilizados neste processo possuem, permite uma baixa porosidade nas últimas camadas obtidas no exterior das peças. A operação de fusão do pó metálico é repetida camada a camada até a altura total da peça ter sido atingida, onde esta será então removida após o seu arrefecimento. Este processo possui um elevado nível de reciclabilidade do pó não processado, o que permite um maior aproveitamento da matéria-prima que é colocada na máquina. Outra particularidade deste processo é que tal como outros deste género introduz calor na produção da peça, o que implica necessariamente tensões residuais que podem exigir um tratamento térmico de redução de tensões (ADDISPACE, 2017).

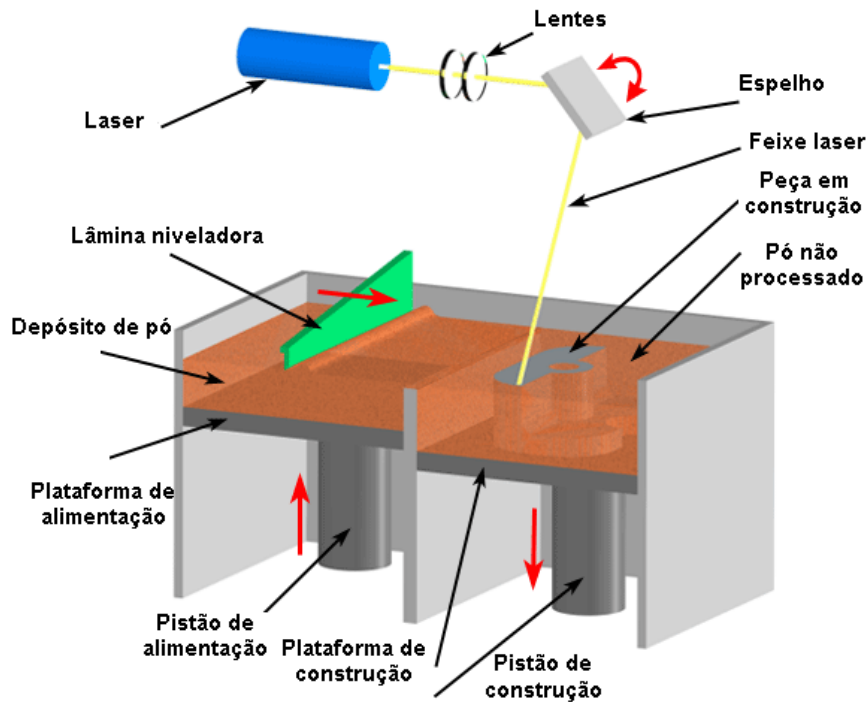


Figura 11: Esquema do funcionamento do processo de SLM “adaptado de (CustomPartNet, 2019)“.

Fusão seletiva por feixe de elétrons (EBM ou SEBM) foi desenvolvida na década de 90 pela Chalmers University of Technology e comercializada posteriormente pela empresa sueca Arcam AB no início do século XXI. A tecnologia pode ser comparada com SLM, sendo que o EBM recorre a um feixe de elétrons em detrimento do feixe laser e utiliza dipolos magnéticos invés de espelhos galvanométricos, o que permite atingir velocidades muito superiores às do processo de SLM, sendo esta a grande vantagem deste processo que o faz sobressair em relação a outras tecnologias (Karlsson, 2015).

O sistema (Figura 12) é constituído por uma fonte de energia, um canhão de elétrons direcionado sobre o alvo e uma plataforma de construção com pós metálicos. O feixe de elétrons é gerado pelo canhão de elétrons, onde uma corrente elétrica percorre um filamento de tungsténio, onde este ao aquecer irá produzir o feixe. A orientação do feixe de elétrons é realizada através de dois dipolos magnéticos e uma lente de deflexão, não requerendo por isso qualquer componente móvel para a orientação do feixe. Dessas lentes, a primeira irá corrigir o astigmatismo e gerar um feixe de elétrons circular com uma distribuição Gaussiana de energia, enquanto a segunda lente irá focar o feixe num ponto de cerca de 0.1 mm de diâmetro, direcionando-o sobre o alvo. Finalmente uma lente de deflexão irá controlar o varrimento do feixe ao longo da área de trabalho. Este feixe ao incidir nos pós metálicos funde-os na totalidade (Karlsson, 2015), (Herzog *et al.*, 2016).

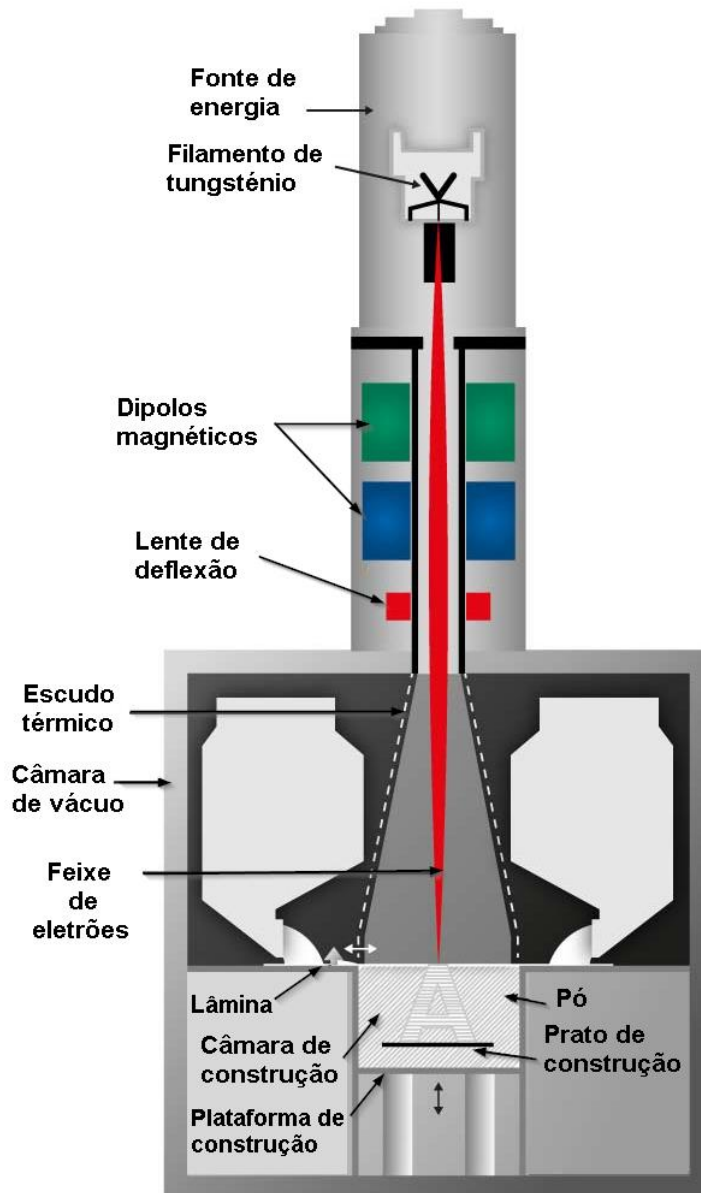


Figura 12: Esquemática do processo de EBM “adaptado de (ADDISPACE, 2017)”.

A necessidade do vácuo na construção das peças por este processo deve-se a algumas razões. Os elétrons necessitam estar num ambiente de médio vácuo ($< 10^2$ Pa) para serem acelerados, de modo a evitar a dispersão de elétrons, sendo que estes ao entrarem em contacto com moléculas de ar ou de gás deflectem ao serem atraídos pela sua massa, o que resultaria numa perda de energia do feixe. O vácuo combinado com o feixe de elétrons permite assim um processo muito mais eficiente em termos energéticos, cerca de cinco a dez vezes superior a tecnologias laser. A existência da câmara de vácuo permite ainda que ligas metálicas muito reativas quimicamente tais como o Ti e o Al possam ser processados e evita a oxidação das peças durante o seu processamento (Attar, 2011), (Karlsson, 2015).

2.2.5. Projeção de pó

Os processos de projeção de pó, tal como o *Cold Spray*, são bastante utilizados para melhorar propriedades, tais como a resistência à corrosão, de peças já existentes, ao fazer revestimentos, ou seja, adicionar uma ou mais camadas superficiais de um material com diferentes características do material base (T.Srivatsan, Manigandan e T.Sudarshan, 2015).

Uma aplicação mais recente deste processo é em AM. Este processo (Figura 13) deposita camadas sucessivas de material através de uma projeção de pó metálico, esta projeção pode atingir velocidades de até 1000 m/s, tal permite uma enorme velocidade de construção, o que permite obter peças num período de tempo bastante curto. Para funcionar recorre a hélio como meio de transporte das partículas de metal, partículas estas que ao embater no material base o penetram e criam uma ligação de forma quase imediata (Jackson, 2015).

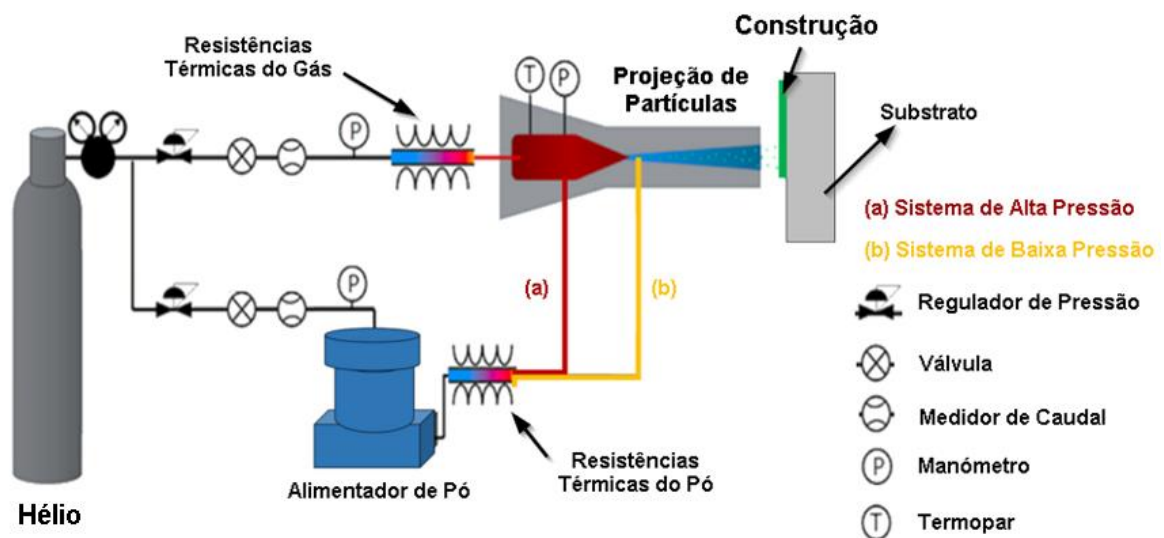


Figura 13: Representação esquemática do processo de *cold spray* “adaptado de (Jodoin, Gartner e Irissou, 2016)“.

A grande vantagem deste processo, para além do tempo de fabrico, é não necessitar de energia térmica para criar ligação entre os materiais, o que implica que não existem zonas afetadas pelo calor que necessitem de sofrer um tratamento térmico de redução de tensões.

A desvantagem deste processo que o torna muito pouco utilizado é a baixa precisão geométrica (Jackson, 2015), (Jodoin, Gartner e Irissou, 2016).

2.3. Simulação numérica por elementos finitos

De modo a obter resultados o mais otimizados possível devem ser utilizados *softwares* de simulação numérica. Estes *softwares* simulam através de cálculos matemáticos o comportamento de sólidos em 3D, estes podem ser componentes estruturais ou até furos por onde passam fluidos, determinando assim uma previsão dos resultados que serão observados na realidade.

2.3.1. Análise estrutural

De modo a avaliar a capacidade de um componente suportar as cargas a que está submetido no sistema mecânico em que está inserido pode ser efetuada uma análise estrutural a este. Tal permite com elevado grau de exatidão perceber o comportamento que o componente irá apresentar às solicitações a que este é sujeito. Apenas assim é possível perceber se o componente desenvolvido irá conseguir cumprir a sua função sem entrar em cedência, ou seja, sem falhar na sua função ao deformar plasticamente ou até ao atingir a rotura (Figura 14).

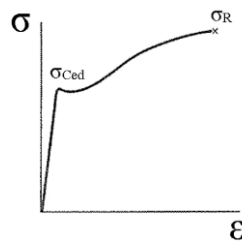


Figura 14: Curva genérica de tensão vs. deformação para materiais dúcteis (Beer e Johnston, 2006).

De modo a prever a cedência do material é utilizado um critério de cedência. Exemplos de alguns critérios de cedência utilizados são Mohr, Tresca e von Mises. Sendo o critério de Mohr utilizado em materiais frágeis, os critérios de Tresca e de von Mises são utilizados em materiais dúcteis tais como o aço. De ambos, o critério de cedência mais utilizado é o critério de von Mises, sendo o critério de Tresca o mais exigente dos dois (Beer e Johnston, 2006).

Matematicamente pode-se exprimir o critério de cedência de Tresca como:

$$|\sigma_a - \sigma_b| \leq \sigma_{ced}$$

Graficamente o resultado será idêntico ao representado na Figura 15:

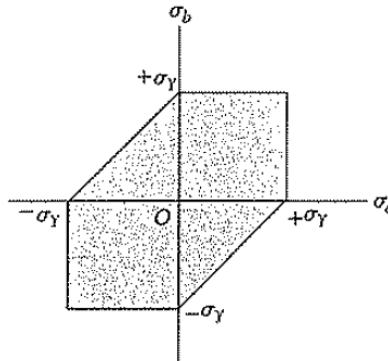


Figura 15: Critério de Tresca para o estado plano de tensões (Beer e Johnston, 2006).

Quanto ao critério de cedência de von Mises, este pode ser expresso matematicamente como:

$$|\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b + \sigma_b^2| \leq \sigma_{ced}^2$$

Graficamente o resultado será semelhante ao representando na Figura 16:

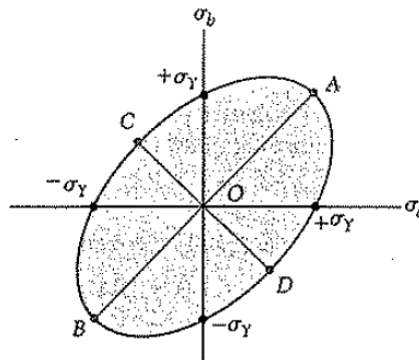


Figura 16: Critério de von Mises para o estado plano de tensões (Beer e Johnston, 2006).

Através destes critérios de cedência é possível então avaliar o desempenho de um componente estrutural face às solicitações a que este está exposto e retirar valores de alguns parâmetros, tais como:

- Tensões de von Mises;
- Deslocamento total.

2.3.2. Simulação numérica do enchimento

O conceito da simulação de enchimento começou nos anos 50 com a tentativa de calcular o tempo de enchimento de moldes de injeção de termoplásticos de peças com geometrias relativamente simples, ainda em 2D, sendo que apenas na década de 70 surge o primeiro *software* comercial de simulação numérica de enchimento, conhecido por Moldflow® (Kamal, 2009).

A reologia deve-se entender como a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, enquanto a viscosidade pode ser entendida como a quantificação da resistência de um fluido às tensões de corte por ele solicitadas (Kamal, 2009).

Os termoplásticos durante o processo de injeção apresentam-se sob a forma de fluidos de elevada viscosidade e possuem um comportamento de fluido não newtoniano (Campo, 2006), não sendo, portanto, a sua tensão de corte proporcional ao seu gradiente de velocidades, resultando numa viscosidade complexa de calcular (Quintela, 2014). Devido a este facto, existe a necessidade de *softwares* de simulação numérica de modo a prever o comportamento dos materiais poliméricos dentro do molde durante o processo de injeção.

Dentro da simulação numérica de enchimento, uma simulação de refrigeração permite avaliar além de outros parâmetros o diferencial de temperaturas do fluido, a perda de pressão, valores de caudal e o tempo de ciclo previsto, muito importante a nível económico. Assim é possível corrigir os circuitos de refrigeração projetados antes de estes serem executados no molde.

Com a utilização de *software* de simulação do enchimento, o tempo de fabrico despendido na conceção e correção de circuitos de refrigeração decresce cerca de 40% e o tempo de ciclo pode ser reduzido até 15% de acordo com alguns autores (Rosato, 2000).

As variáveis mais importantes para um estudo de refrigeração são as seguintes (Rosato, 2000), (Campo, 2006), (Shoemaker, 2006).

- Localização/diâmetro/comprimento dos circuitos de refrigeração;
- Rugosidade da superfície do furo de refrigeração;
- Perda de pressão e caudal do circuito de refrigeração;
- Existência de cascatas, mergulhadores ou pinos térmicos;
- Propriedades do fluido refrigerante e do molde;

De notar que existem três elementos distintos do arrefecimento da peça plástica, sendo eles:

- Arrefecimento por condução do material polimérico fundido com a zona moldante;
- Condução do calor do material fundido para o circuito de refrigeração;
- Convecção do calor pelo circuito de refrigeração.

O número de Reynolds (Re) (Quintela, 2014) é um número adimensional utilizado para representar o regime de escoamento de uma conduta. Este representa essencialmente o quociente entre as forças de inércia com as forças viscosas inerentes ao fluido. De referir que para valores de Re superiores a 2300 o escoamento entra no regime turbulento, sendo que apenas para valores muito superiores, na grandeza dos 10000 o regime turbulento se encontra totalmente desenvolvido (White, 2011). Teoricamente, quanto maior o número de Reynolds melhor será a refrigeração do circuito, este deverá tomar valores superiores a 3500 (Shoemaker, 2006).

Um arrefecimento homogéneo permite uma recristalização do polímero uniforme, tal significa uma redução substancial das tensões residuais internas, o que se reflete num produto final com mínimo empeno e alargado tempo de vida. Resulta também num menor tempo de ciclo, tal como referido anteriormente, o que se reflete diretamente nos custos de produção de injeção e nos prazos de entrega das peças produzidas (Whelan e Goff, 1990), (Shoemaker, 2006).

2.3.3. Otimização topológica

Otimização topológica é um método de *design* que recorre a matemática e *software* avançados que permitem uma distribuição correta de material face às solicitações a que a uma determinada peça é submetida, de modo a reduzir o volume de material final e, portanto, a sua massa (Querin e Victoria, 2017).

Totalmente díspar dos restantes métodos de *design*, este método parte de linhas 2D (Figura 17) ou de um sólido em formato 3D CAD (Figura 18) onde a partir de constrangimentos definidos pelo utilizador o *software* irá transformar a informação que recebe num problema de distribuição de massas, colocando massa apenas nos locais da peça que achar necessário.

Tal permite reduzir substancialmente a massa de uma peça, muito importante em indústrias tal como a aeronáutica, e no caso de peças produzidas por fabrico aditivo, permite uma redução do volume de material processado, o que reduz significativamente o custo final de uma peça (Sigmund e Bendsø, 2003).

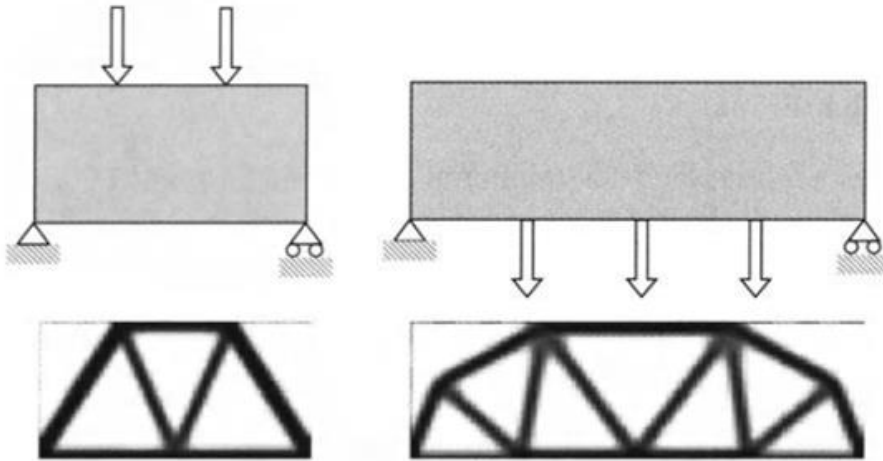


Figura 17: Otimização topológica em 2D (Sigmund e Bendsø, 2003).

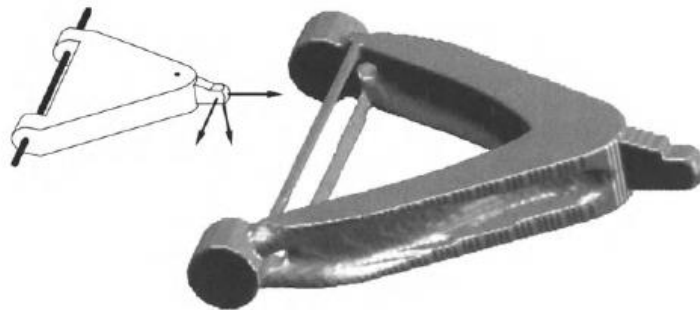


Figura 18: Conceito de otimização topológica de um braço de controlo de suspensão (Sigmund e Bendsø, 2003).

A simbiose desta metodologia de *design* com os processos de fabrico aditivo permite aos *designers* e engenheiros deixar de desenhar em função do método de fabrico, embora as tecnologias aditivas ainda possuam algumas limitações, no entanto aumenta substancialmente a liberdade criativa do projeto.

2.4. *Design* para fabrico aditivo

No *design* para AM deve-se considerar uma série de situações (Emmelmann, Herzog e Kranz, 2007), (Kranz, Herzog e Emmelmann, 2015), estando as consideradas mais importantes resumidas em seguida:

- Reduzir o volume e altura da peça irá reduzir significativamente o tempo e custos de fabrico. Tal irá reduzir o número de camadas que o laser irá fundir e o tempo que o laser irá estar ativo;
- A orientação da peça na câmara de trabalho irá influenciar o tempo de fabrico, mas não só, esta também irá influenciar a precisão da geometria construída;
- A espessura da camada de pó irá determinar significativamente a resolução geométrica da peça, o tempo de fabrico e a rugosidade superficial. Quanto menor for a espessura da camada maior será a resolução geométrica obtida, no entanto o tempo de fabrico será maior;
- A construção em camadas de uma face com inclinação irá resultar no chamado “efeito escada”, pelo que o contorno da peça será uma aproximação do pretendido. Ou seja, quanto maior o ângulo entre a superfície a construir e a plataforma de construção, maior será a rugosidade obtida.
- A utilização de estruturas de suporte é recomendada para ângulos críticos de $45^{\circ} \pm 10^{\circ}$ em relação à horizontal do prato de construção. É aconselhável incluir os suportes na geometria da peça ou evitar ângulos críticos, de modo a estes não serem necessários.
- Todos os furos devem estar incluídos na peça, deste modo reduz-se o volume da peça e, portanto, os custos de fabrico aditivo e de processos adicionais.

2.4.1. Conceção dos canais conformáveis

A conceção em projeto dos circuitos com canais conformáveis é idêntica à conceção dos circuitos realizados por furação convencional. A grande diferença entre ambos é a liberdade de conceção existente nos canais conformáveis. Estes, devido ao processo de fabrico, não necessitam de ser furados por brocas convencionais, sendo construídos à medida que a peça

toma forma, simplificando o processo de fabrico, evitando posições de *setup*, e de montagem do molde (Figura 19), reduzindo o número de componentes, tais como tampões roscados.

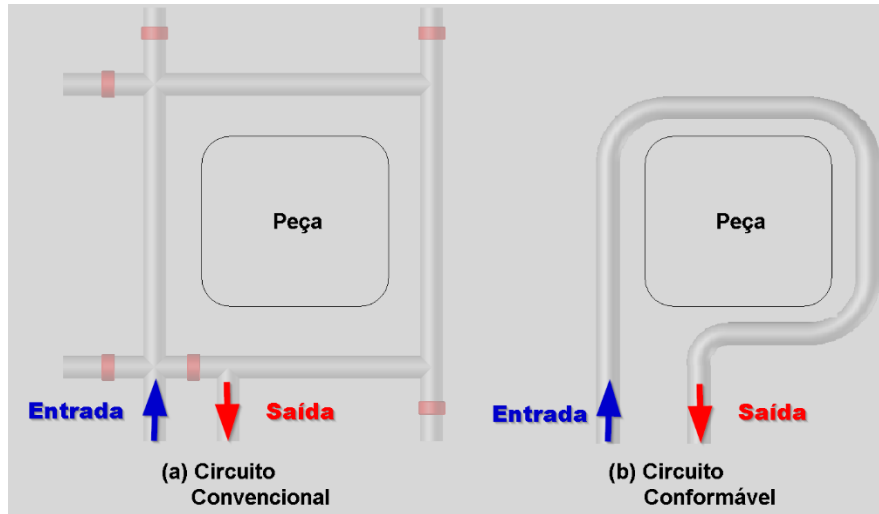


Figura 19: Representação genérica de um circuito convencional (a) e um circuito conformável (b).

Tal como no método convencional existem recomendações para a conceção deste tipo de refrigeração, também estas baseadas em teorias de condutividade térmica, tal como a Lei de Fourier, de modo a manter a temperatura à volta da cavidade a um nível constante e o arrefecimento o mais homogêneo possível.

De modo a respeitar as afirmações anteriores devem ser tidos em consideração três parâmetros no projeto dos circuitos de refrigeração (Mayer, 2009), (As, van *et al.*, 2017).

- Diâmetro do canal;
- Distância entre centros dos furos;
- Distância entre o circuito de refrigeração e a cavidade.

A quantificação dos parâmetros referidos anteriormente pode ser realizada através das relações apresentadas na Tabela 2 e representadas esquematicamente na Figura 20 (Mayer, 2009), (As, van *et al.*, 2017), de modo a otimizar o circuito de refrigeração da zona moldante.

Tabela 2: Parâmetros a selecionar para a construção de um circuito de refrigeração conformável (Mayer, 2009), (As, van *et al.*, 2017).

Espessura de parede da peça a injetar [mm]	Ø Canal (b) [mm]	Distância entre centros dos furos (a) [mm]	Distância entre centro dos furos e cavidade (c) [mm]
< 2	4 - 8	[2 ; 3] * b	[1.5 ; 2] * b
2 - 4	8 - 12	[2 ; 3] * b	[1.5 ; 2] * b
4 - 6	12 - 14	[2 ; 3] * b	[1.5 ; 2] * b

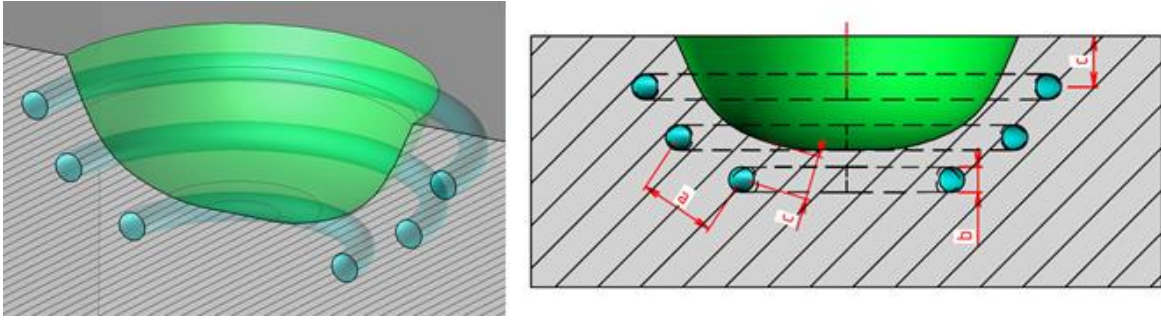


Figura 20: Representação esquemática em 3D (à esquerda) e corte transversal (à direita) dos parâmetros a respeitar durante o projeto dos canais de refrigeração conformáveis.

De modo a otimizar o circuito de refrigeração conformável deve-se procurar utilizar o menor valor possível da variável “C”, teoricamente quanto mais perto o canal de refrigeração estiver da superfície moldante maior quantidade de calor o fluido deste irá transferir.

Quanto ao diâmetro dos canais, o processo de SLM possui a capacidade de construir canais de 1 mm de diâmetro. No entanto canais com diâmetros tão pequenos devem ser evitados devido à possibilidade de obstrução do canal derivado a deposições de material ao longo do ciclo de refrigeração por parte do fluido. O mesmo se aplica em secções não circulares de pequena dimensão, onde a passagem de fluido poderá criar obstruções de material depositado.

Uma das vantagens dos canais conformáveis é a possibilidade de alterar a forma da secção do canal ao longo do circuito para a forma que melhor se adequa ao *design* da peça existente, podendo passar de uma secção circular para uma geometria em elipse, por exemplo. De notar que de modo a que a estrutura do canal seja suportada por si própria, não sendo necessário a utilização de suportes (não será possível a remoção destes), os ângulos das zonas suspensas da secção deverão ser superiores a 45° (Ruffner, 2012).

Na aplicação de canais de pequena secção ter-se-á de ter em consideração a necessidade de recorrer a fluidos de refrigeração tratados, de modo a evitar a obstrução dos canais (Ruffner, 2012), a possibilidade de recorrer a filtros de impurezas e até revestimento dos canais de refrigeração com laca ou por niquelagem, de modo a prevenir a corrosão (iQtemp, 2019).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

3. Casos de estudo – Metodologia experimental

Foram desenvolvidos dois componentes a serem produzidos pelo processo aditivo de SLM. O seu desenvolvimento englobou a criação do 3D do componente, ambos totalmente parametrizados, sendo deste modo possível criar uma gama normalizada para ambos componentes.

Após a criação dos componentes foram efetuados cálculos para a seleção do material, dentro dos pós processados pela tecnologia de SLM, e efetuadas simulações numéricas, nomeadamente análises estruturais e otimizações topológicas aos componentes tal como simulações de refrigeração aos canais conformáveis de um dos componentes desenvolvidos.

Os componentes identificados como adequados a serem produzidos pelo processo de SLM estão relacionados diretamente com o processo de injeção de um molde. O primeiro, um casquilho refrigerado para otimizar o desempenho de um bico de injeção, um segundo, um segundo referente a um inserto de injeção em canal frio do tipo “banana”.

3.1. Casquilho refrigerado

O casquilho refrigerado pode ser identificado como um inserto para o bico de injeção, sendo que este pode possuir duas funcionalidades quando aplicado num molde de injeção, sendo elas:

- Possibilitar a inserção de um ponto de injeção (injeção direta do bico de injeção na peça) em zonas onde a espessura ou inclinação da peça (cavidade) torna-se crítica e existe a necessidade de aplicação de um inserto;
- Otimizar o circuito de refrigeração local do bico de injeção, evitando a ocorrência de pontos quentes junto ao ataque da peça.

De modo a desenvolver este casquilho refrigerado é necessário criar um componente cujas dimensões se adequem a vários bicos de injeção existentes no mercado, tornando-se o próprio casquilho refrigerado um componente normalizado, com variantes dimensionais e

de forma. Foram utilizadas neste estudo as referências de dois conhecidos fornecedores de sistemas de injeção de canais quentes, nomeadamente a MASTIP® e a HRS®.

Outra necessidade no desenvolvimento deste componente foi otimizar o *design* da refrigeração de canais conformáveis, de modo a que este se aproximasse o mais possível do exterior do casquilho, o que deverá em teoria permitir uma maior quantidade de calor transferida do local onde aplicado. Para tal recorreu-se aos dados da Tabela 2, onde se pode retirar a informação relativa aos diâmetros, distâncias entre furos e distância entre zona moldante e furo refrigerado a utilizar.

Num projeto real, existem duas formas de identificar a necessidade de um casquilho refrigerado deste tipo. A primeira, o método empírico, onde através da experiência com projetos idênticos o moldador sabe que irá necessitar de uma refrigeração otimizada à volta dos bicos de injeção. A outra forma, sendo a mais correta, é realizando uma simulação numérica que compreenda as fases de enchimento, compactação e arrefecimento da peça a injetar. Assim, com o objetivo de validar o circuito de refrigeração dimensionado foi realizado um estudo de modo a identificar se o circuito não apresenta perda de carga excessiva, e então, verificar se o mesmo é adequado à função que se pretende.

Após a fase preliminar do *design* do componente (Figura 21), onde ficou definido como este se iria constituir e quais os tipos de bicos de injeção que se iriam utilizar para criar a gama normalizada do componente, avançou-se para a criação de um componente parametrizado, isto é, um componente que recorre a uma tabela de dados para definir as suas dimensões. Estas dimensões são criadas sob a forma de incógnitas, sendo desta forma possível utilizar apenas um modelo 3D no *software* CAD que se adequa para qualquer bico do sistema de injeção que se queira utilizar no projeto de moldes, desde que para este existam dados dele na base de dados, bastando selecionar qual a referência do componente que corresponde às dimensões de cada bico de injeção.

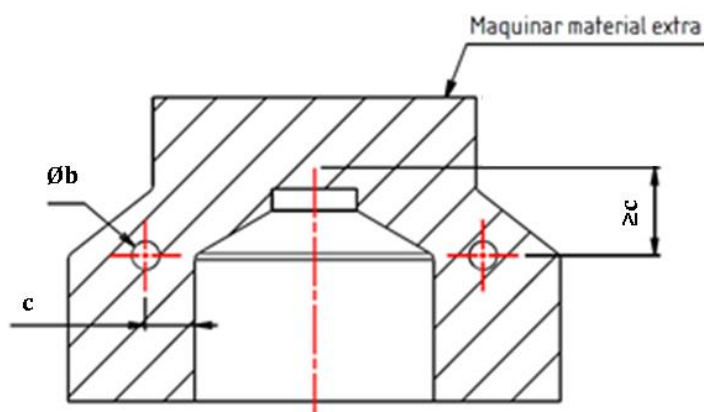


Figura 21: Representação em corte do preliminar do componente.

3.2. Inseto de injeção

O inseto de injeção em canal frio do tipo “banana” pode ser identificado como um inseto de injeção, aplicado no ataque, sendo a funcionalidade deste quando aplicado num molde de injeção a de permitir a injeção pelo lado da bucha, ou seja, injetar pelo lado esteticamente não visível das peças plásticas, o que possibilita a produção de peças plásticas pelo método de injeção sem marcas de injeção do lado da cavidade (lado geralmente visível).

Foram tidas em conta as dimensões mais usuais nos insertos deste tipo produzidos convencionalmente, tendo sido criada uma gama com base nestes dados. Quanto aos diâmetros de injeção, estes foram criados de modo a seleccionar um diâmetro de injeção específico para a aplicação pretendida, não sendo necessário abrir o ponto de injeção, mas sim apenas remover o material localizado na zona moldante. Também foi desenvolvida uma gama de jitos para cada inserto. Deste modo é possível adaptar qualquer um destes insertos ao que se pretende colocar no molde de injeção, quer em termos de ponto de injeção como referido anteriormente, como também em secção do jito.

Após ter sido criado um conceito inicial (Figura 22) a partir dos insertos convencionalmente produzidos, partiu-se para a parametrização do componente tal como feito anteriormente para o casquilho refrigerado.

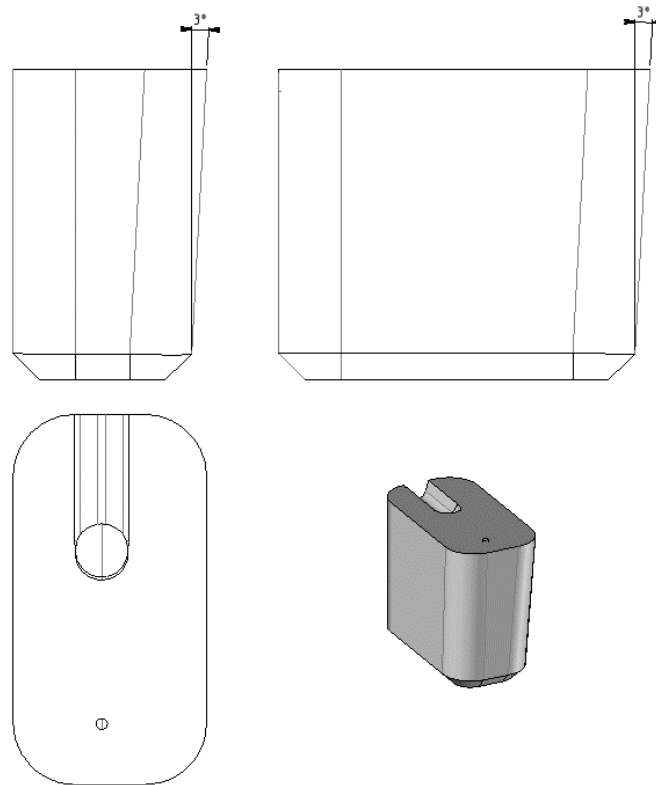


Figura 22: Conceito inicial do inserto de injeção do tipo “banana”.

3.3. Equipamento

O equipamento considerado neste projeto foi o ProX® DMP300 (Figura 23) da 3DSystems®. Este equipamento utiliza a tecnologia SLM, pertencendo esta tal como referido anteriormente aos processos de fusão seletiva por laser. Este equipamento é indicado para a produção de componentes metálicos, componentes esses cujas características se enquadram nos componentes dos casos de estudo deste projeto, ou seja, componentes com rigor dimensional considerável e razoável valor de rugosidade superficial.



Figura 23: ProX® DMP 300 (3DSystems, 2017).

Esta máquina possui algumas limitações ao nível de capacidade de carga, sendo que a peça juntamente com o prato de construção da máquina não deverá superar os 100 kg de massa. Outra limitação desta máquina são as dimensões da zona de construção, sendo que a área de construção efetiva é cerca de 245x245 mm e a altura de construção efetiva, considerando a espessura do prato de construção juntamente com a altura da peça não pode superar os 325 mm de altura. Estas e outras limitações da máquina estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características da ProX® DMP300.

Capacidade máxima de carga	100 kg
Área de construção efetiva	245x245 mm
Altura de construção efetiva	325 mm
Tipo de laser	Laser de Fibra
Comprimento de onda	1070 nm
Potência do laser	500 W
Precisão	$\pm 50 \mu\text{m}$
Gás inerte	Nitrogénio ou Árgon
Deposição de material	Por rolo nivelador

3.4. Material processado

Existe uma gama de pós cada vez mais vasta que podem ser processados pelas tecnologias de fabrico aditivo metálico pelo processo de SLM.

Dos materiais processados, fez-se uma seleção destes materiais, sendo que as suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas foram sumarizadas na Tabela 4 (3D Systems, 2019).

Ao nível dos aços existem dois grupos nesta tabela, *maraging steel* e aço inoxidável, este último um aço muito interessante devido à excelente resistência à corrosão, existindo dois tipos de aço inoxidável com diferenças significativas relativamente à dureza superficial obtida após tratamento térmico. O *maraging steel* é um aço muito utilizado em moldes para injeção, extrusão e fundição. Este é um aço com boa resistência à corrosão, boa condutividade térmica e com baixo teor de carbono, muito interessante para o processo de AM. Restando nesta seleção as ligas de cobalto-crómio e as ligas de titânio, ambas com características muito diferentes dos referidos anteriormente. As ligas de titânio com grande aplicação na indústria aeronáutica e aeroespacial, possuem muito boa resistência a altas temperaturas, resistência à corrosão e permitem criar peças muito leves. As ligas de cobalto-crómio possuem alta resistência à corrosão, ao desgaste e a altas temperaturas. Estas são utilizadas num vasto leque de aplicações, desde a indústria de fundição até ao fabrico de próteses dentárias (3D Systems, 2019).

Tabela 4: Propriedades gerais dos pós selecionados comercializados pela 3D Systems®.

Ref. ^a do Fabricante	Designação do Material	Densidade [g.cm ⁻³]	Dureza após tratamento térmico	E – Módulo de Young [Gpa]	Condutividade térmica a 20°C [W/m°C]
LaserForm® Maraging Steel (B)	1.2709	8,1	55 ± 3 HRC	185 ± 20	20,9
LaserForm® 316L (A)	1.4404	8,0	90 ± 6 HRB	180 ± 15	15
LaserForm® 17-4PH (A)	1.4542	7,8	32 ± 4 HRC	195 ± 10	18,3
LaserForm® CoCrF75 (A)	UNS R30075	8,4	39 ± 3 HRC	225 ± 5	14
LaserForm® Ti Gr5 (A)	3.7165	4,4	40 ± 2 HRB	100 ± 20	6,7

3.5. Segurança

Em termos de segurança existem uma série de riscos na utilização de uma máquina de SLM, nomeadamente, riscos com a inalação do pó metálico, a possibilidade de reatividade de alguns pós em armazém, cuidados no armazenamento do gás inerte, riscos químicos, riscos na utilização do laser e riscos biológicos. Toda a informação apresentada neste subcapítulo foi retirada do manual da máquina ProX® DMP300 da 3Dsystems® (3DSystems, 2017).

Durante a operação de processamento não existem riscos para o operador, no entanto durante a remoção da peça ou durante a limpeza e manutenção da máquina é necessário ter especial atenção com alguns pós que podem entrar facilmente em combustão, cuidados com a inalação dos pós, pois no menor dos casos estes podem causar irritação, e extremo cuidado com os pós reativos. Para estes casos deve-se respeitar a diretiva europeia 99/92/EC para atmosferas com risco explosivo e a diretiva 2014/34/EU para equipamentos e sistemas de proteção em atmosferas com potencial explosivo.

Dentro dos pós metálicos podem-se dividir estes em duas classes: os pós com risco para a saúde no caso de exposição e os pós com risco de combustão ou de explosão (Figura 24).

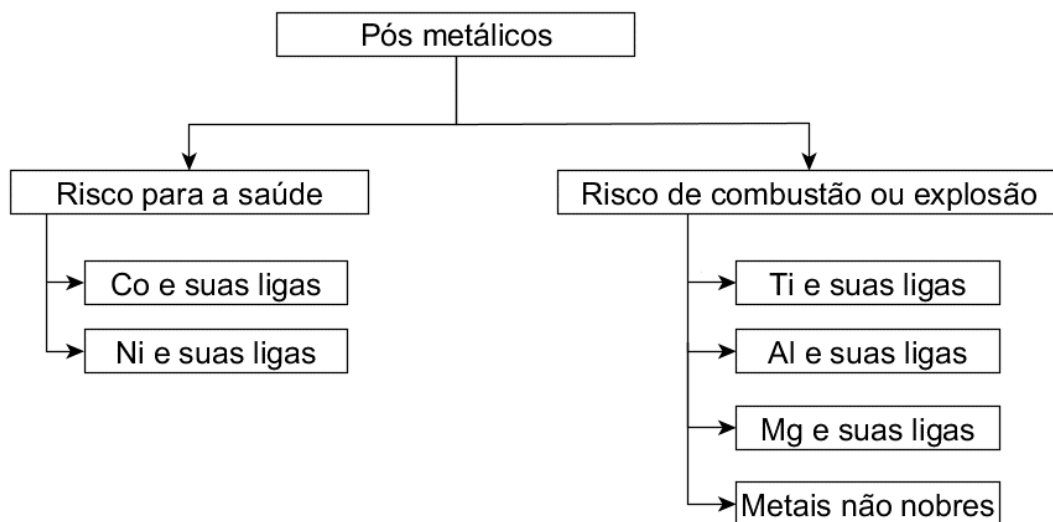


Figura 24: Pós metálicos e seus riscos para a saúde e de combustão ou explosão “adaptado de (3DSystems, 2017) “.

O aço 1.2709 tendo na sua composição 18% Ni torna-se então um pó metálico com risco para a saúde quando inalado, devendo ser tomadas precauções a nível respiratório com a utilização de máscaras de proteção. Com ligas de cobalto deve-se tomar especial atenção pois este material é conhecido por ser venenoso.

O armazenamento destes pós reativos deve ser feito em contentores fechados, condutores e situados numa superfície condutora, de modo a prevenir a sua combustão. Deste modo previne-se a combustão de pós reativos. No armazenamento de pós de alumínio ou de ligas de magnésio deve-se evitar a todo o custo a utilização de extintores de incêndio com água na sua composição, pois existe o risco de explosão quando estes pós entram em contacto com moléculas de hidrogénio.

Durante o processo produtivo da máquina de fusão seletiva a laser são utilizados gases de modo a criar uma atmosfera inerte com o objetivo de prevenir combustões. Esses gases, chamados de gases inertes, são nitrogénio e/ou árgon.

Dentro de uma sala comum a percentagem de oxigénio é cerca de 21%. No caso de ocorrer uma fuga de gás inerte para a sala tal irá reduzir a quantidade de oxigénio na sala, pelo que ocorrerá um perigo para o operador. Então, deverá existir perto do chão, devido à maior densidade do árgon face ao oxigénio, um monitor de controlo de oxigénio de modo a que o operador seja alertado no caso de o teor de oxigénio na sala descer subitamente. No caso de o operador estiver exposto a cerca de 12% ou menor percentagem de oxigénio numa sala, ele irá ficar inconsciente sem nenhum sintoma que o alerte para tal perigo. A existência de um monitor de controlo de oxigénio é assim essencial para uma atividade segura do sistema produtivo.

O sistema de SLM da ProX® DMP300 contém um laser de fibra, este tipo de laser está categorizado na Classe IV da norma IEC/EN 60825-1. Tal implica que existe o perigo elevado de queimaduras corporais, danos potenciais aos olhos e perigo de incêndio. No entanto como o laser opera totalmente no interior da máquina e a máquina é classificada como Classe I, é considerado pelo fabricante que não são emitidas emissões de perigo durante as operações de fabrico.

Devido à radiação direta do laser não se deve olhar diretamente para o feixe laser sem proteção. A radiação por reflexão do feixe laser também é prejudicial para o operador, devido a tal, a janela de visualização da câmara tem de obedecer aos padrões europeus de segurança de modo a permitir ao operador ver a operação de fabrico sem danos para a sua saúde. Ainda assim, por segurança, deverá ser respeitada a norma europeia EN 207 de utilização de óculos de segurança durante a operação da máquina.

4. Procedimento experimental

Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento de dois componentes tal como referido anteriormente. Para tal, ao nível do desenho recorreu-se ao *TopSolid 7*® um *software* de modelação CAD 3D para desenhar os componentes e fazer a sua parametrização. Quanto aos *softwares* de simulação numérica de elementos finitos recorreu-se ao *FEMAP*® para fazer as análises estruturais dos componentes e ao *SolidEdge ST10*® para criar o conceito topologicamente otimizado.

Quanto ao estudo de enchimento recorreu-se ao *Cadmould*® *3D-F*, um *software* comercial alemão de simulação numérica do processo de injeção. Este *software* possibilita a importação das linhas dos circuitos de refrigeração do molde de modo a simular a refrigeração tal como ela existe no molde. Além disso possibilita a simulação da compactação, o que através das propriedades mecânicas existentes em cada ficheiro de dados de cada material possibilita o cálculo do empeno que irá ocorrer na peça.

De uma forma simplificada é possível identificar a sequência das etapas de desenvolvimento dos componentes no fluxograma da Figura 25.

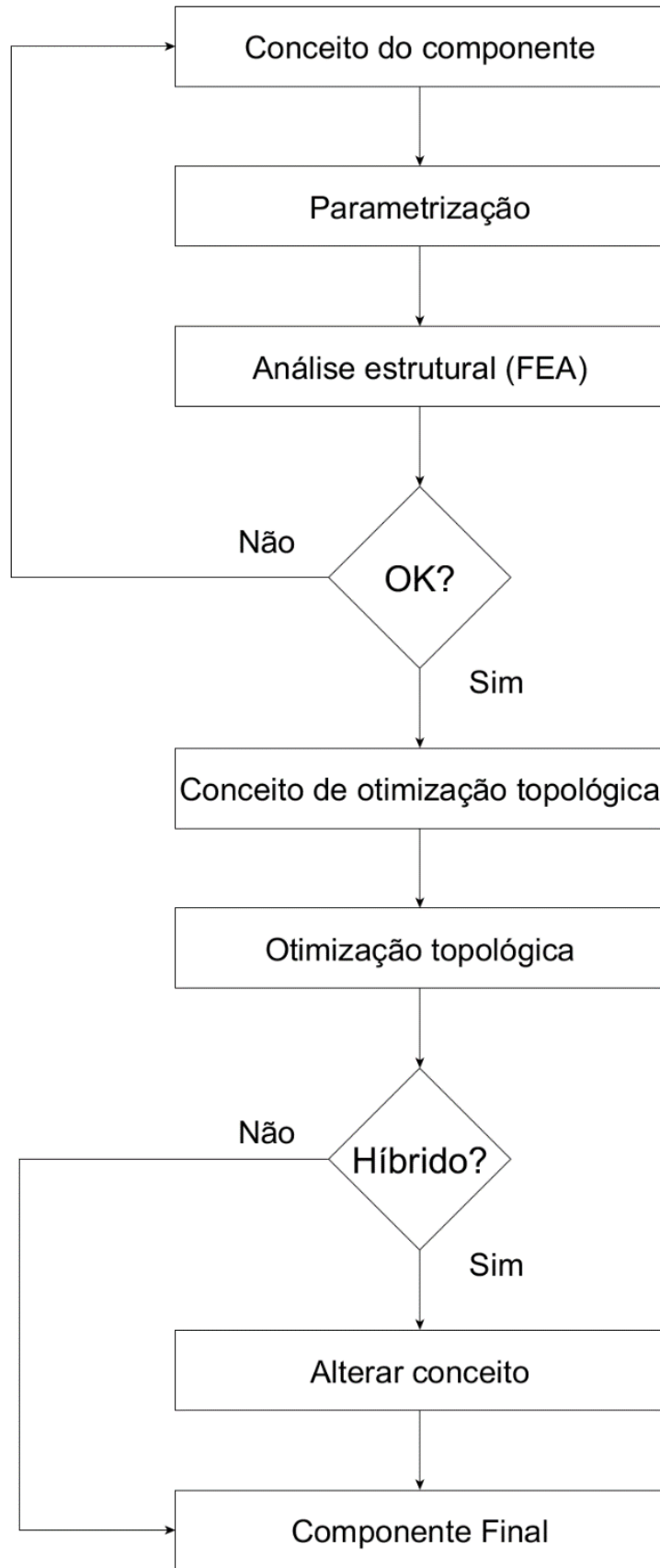


Figura 25: Fluxograma do desenvolvimento dos componentes.

4.1. Desenvolvimento do casquilho refrigerado

Após a fase de estudo da forma que o componente iria tomar (conceito preliminar), o desenvolvimento inicial do 3D do casquilho refrigerado pode ser resumido em dois passos, sendo eles:

- Parametrização de todas as dimensões de modo a adaptar o casquilho a qualquer tipo de bico de injeção;
- Dimensionamento dos circuitos de refrigeração de modo a obter um arrefecimento otimizado.

4.1.1. Parametrização

De modo a parametrizar o componente dividiu-se a fase de criação em três etapas:

- 1.^a Criação do casquilho do bico de injeção;
- 2.^a Criação da refrigeração com circuito de canais conformáveis;
- 3.^a Identificação da forma de fixação do casquilho refrigerado.

O corpo do componente que constitui o casquilho refrigerado baseia-se num *design* simples que pode ser facilmente produzido por um processo de torneamento.

Rapidamente através da atribuição de parâmetros nas cotas do desenho foi possível criar uma secção (Figura 26) que após uma simples operação de revolução iria criar a forma 3D do inserto de injeção.

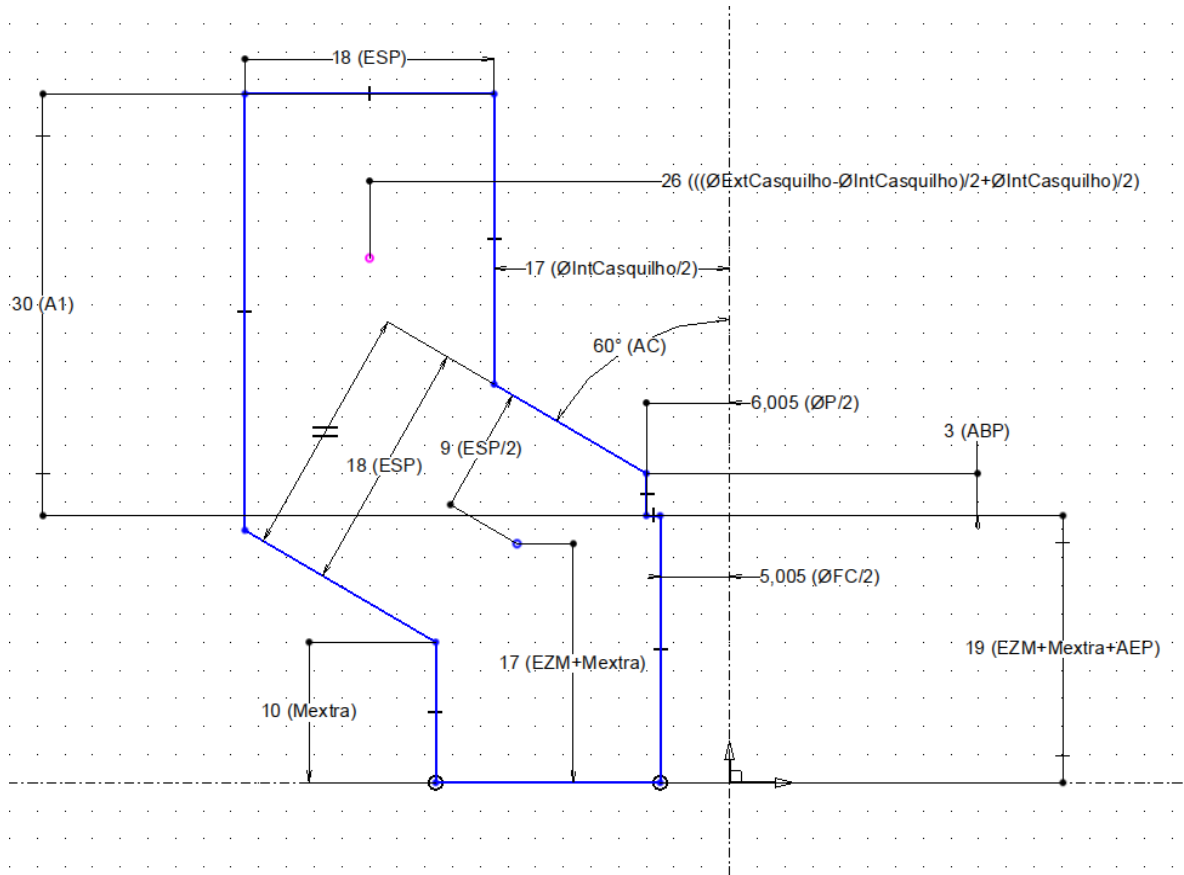


Figura 26: Secção 2D do inserto.

De forma semelhante, mas com algum acréscimo de complexidade foi criado o modelo 3D (Figura 27), que iria ser a base de todas as refrigerações de circuitos com canais conformáveis deste componente, através da utilização de alguns parâmetros e da obtenção de uma geometria que satisfizesse as necessidades de uma refrigeração homogénea.

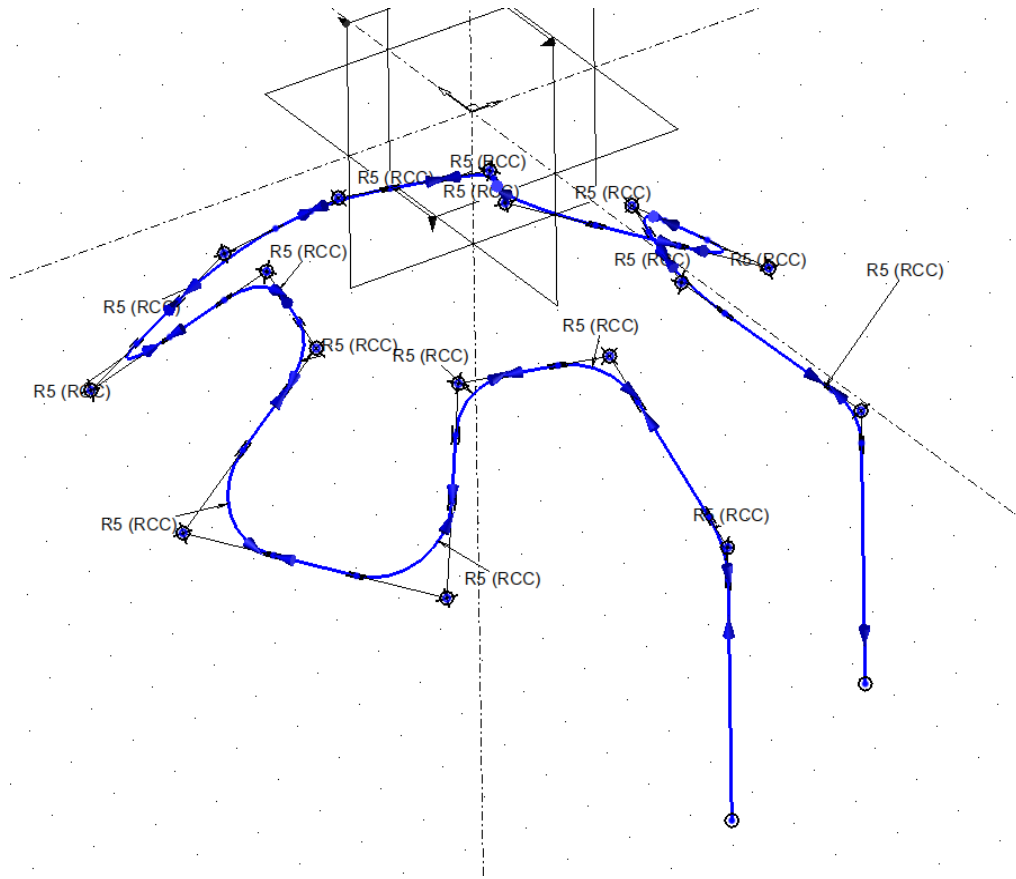


Figura 27: Linhas do modelo 3D da refrigeração de canais conformáveis.

Desta forma foi possível criar um sistema de circuitos com canais conformáveis (Figura 28) que permitisse a alteração sistemática do diâmetro do canal e do afastamento do centro do canal à parede exterior e interior do casquilho conforme necessário, não ocorrendo problemas com a atribuição de raio nas curvas do circuito.

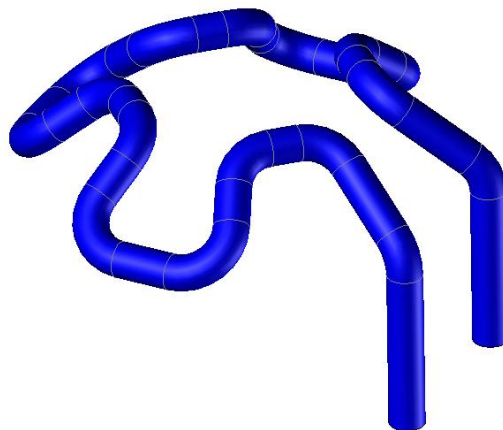


Figura 28: Canais de refrigeração conformáveis em 3D.

Após a criação de ambas geometrias é possível combinar ambas e após a operação booleana de subtração do circuito de refrigeração resultar finalmente no componente finalizado, o casquilho refrigerado (Figura 29).

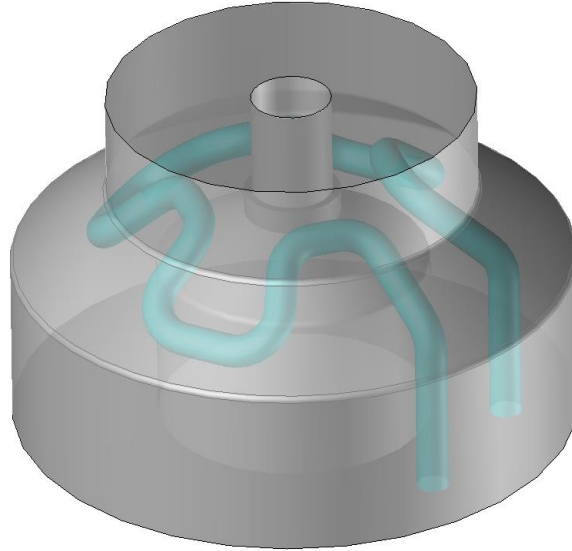


Figura 29: Casquilho refrigerado.

Após a parametrização do componente foi criada a tabela de dados com os parâmetros adequados para cada modelo criado. Foi decidido identificar a referência dada a cada componente criado com o valor de “diâmetro da ponteira / diâmetro do bico”, de modo a tornar a sua seleção o mais intuitiva possível.

Na tabela de dados encontram-se os valores referentes ao sólido do casquilho, estes parâmetros podem-se dividir em dois grupos, *Input* e *Output*:

- *Input*
 - ØB: Diâmetro do bico de injeção;
 - LB: Comprimento do bico de injeção;
 - ØP: Diâmetro da ponteira;
 - FBP: Folga do batente da ponteira;
 - ABP: Altura do batente da ponteira para ajustamento com a cavidade;
 - FL: Folga lateral do bico de injeção;
 - AC: Ângulo interno do batente do casquilho.
- *Output*
 - ETP: Expansão térmica da ponteira;
 - ØFC: Diâmetro do furo central do casquilho.

Foram calculados dois *outputs*, ETP e ØFC. Para o cálculo da expansão térmica da ponteira (Günther, 2019) recorreu-se à seguinte equação:

$$ETP = L \cdot \Delta T \cdot \alpha$$

Onde,

- ETP: Expansão térmica da ponteira [mm];
- L: Comprimento do bico desde o batente da base até à ponteira [mm];
- ΔT : Diferencial entre temperatura de fusão do polímero e temperatura de funcionamento do molde [°C];
- α : coeficiente de dilatação linear do material da ponteira [°C⁻¹].

Para o cálculo do furo central do casquilho recorreu-se à seguinte equação:

$$\text{ØFC} = \text{ØP} - FL$$

Os resultados obtidos para o componente estão apresentados na Tabela 5. Para definir a referência de cada componente selecionou-se “diâmetro exterior da ponteira / diâmetro exterior do bico de injeção”, deste modo a seleção do componente para cada tipo de bico de injeção é intuitiva.

Tabela 5: Parâmetros relativos ao casquilho refrigerado.

Ref. ^a	ØB [mm]	LB [mm]	ETP [mm]	ØP [mm]	ØFC [mm]	FBP [mm]	ABP [mm]	FL [mm]	AC [°]
12/26	26,2	75	0,19	12,01	10,01	0,69	3	2	120
12/38	38,2	75	0,19	12,01	10,01	0,69	2	2	105
14/38	38,2	100	0,25	14,01	12,01	0,75	2	2	105
15/29	29,4	100	0,25	15,01	13,01	0,75	3	2	120
16/38	38,2	150	0,38	16,01	14,01	0,88	2	2	105
23/38	38,9	150	0,38	23,01	21,01	0,88	3	2	120

Relativamente aos parâmetros do circuito de canais conformáveis, estes podem-se dividir também em dois grupos, *Input* e *Output*:

- *Input*
 - $\varnothing C$: Diâmetro do canal de refrigeração;
 - RCC: Raio de transição entre as curvas do circuito de refrigeração.
- *Output*
 - \varnothing_{intC} : Diâmetro interno do casquilho;
 - \varnothing_{extC} : Diâmetro externo do casquilho;
 - ESP: Espessura da parede do casquilho;
 - EZM: Espaço entre o centro do canal e a zona moldante.

Os *outputs* foram calculados através das seguintes fórmulas:

$$\varnothing_{intC} = \varnothing B + 2 \cdot FL$$

$$ESP = 2 \cdot C + \varnothing C$$

$$\varnothing_{extC} = \varnothing_{intC} + 2 \cdot ESP$$

$$EZM = 1,75 \cdot \varnothing C$$

Os resultados obtidos para cada referência estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros relativos ao circuito de refrigeração.

Ref. ^a	$\varnothing C$ [mm]	RCC [mm]	\varnothing_{intC} [mm]	ESP [mm]	\varnothing_{ExtC} [mm]	EZM [mm]
12/26	4	2	30,2	18	66,2	7
12/38	4	2	42,2	18	78,2	7
14/38	5	4	42,2	22,5	87,2	8,75
15/29	5	4	33,4	22,5	78,4	8,75
16/38	6	5	42,2	27	96,2	10,5
23/38	6	5	42,9	27	96,9	10,5

De modo a verificar que a distância mínima entre furos foi garantida recorreu-se a uma verificação de segurança, onde a distância entre furos (L) foi comparada com a distância mínima entre furos dada pelas equações do subcapítulo 2.4.1.

Deste modo, a verificar-se a segurança do dimensionamento, este terá de obedecer à seguinte relação:

$$L \geq \text{Distância entre furos mínima}$$

Na Tabela 7 é possível verificar os valores obtidos do parâmetro “L” para a gama de casquilhos criada. Em todas as referências a distância mínima aconselhada entre furos foi respeitada.

Tabela 7: Distância entre furos real e mínima aconselhada.

Ref. ^a	L [mm]	Distância entre furos mínima [mm]
ST12/26	12,15	10
ST12/38	12,15	10
ST14/38	14,97	12,5
ST15/29	15,41	12,5
ST16/38	17,79	15
ST23/38	20,83	15

Desta forma é muito fácil a utilização do componente pelo operador CAD. Através de uma tabela relativamente pequena de parâmetros de *input* é possível aumentar a gama de normalizados deste componente. Todas as equações que resultam nos parâmetros referidos anteriormente já se encontram dentro do componente (Figura 30), não sendo necessário qualquer introdução destes valores por parte do operador.

Code	ØBico	ØP	ABP	FL	AC	A1	ØCanal	RCC
12/26	26,2mm	12,01mm	3mm	2mm	60°	30mm	4mm	2mm
12/32	38,2mm	12,01mm	2mm	2mm	45°	30mm	4mm	2mm
14/38	38,2mm	14,01mm	2mm	2mm	45°	30mm	5mm	4mm
15/29	29,4mm	15,01mm	3mm	2mm	60°	30mm	5mm	4mm
16/38	38,2mm	16,01mm	2mm	2mm	45°	30mm	6mm	5mm
23/38	38,9mm	23,01mm	3mm	2mm	60°	30mm	6mm	5mm

Figura 30: Tabela de entrada de parâmetros do componente no *software* TopSolid 7®.

Desta forma a inserção do componente é tão fácil como exemplificado na Figura 31, onde basta seleccionar a referência do componente normalizado e inserir o componente na posição pretendida. Existe ainda uma entrada de valores para o “Comprimento do bico” de modo a que a expansão térmica da ponteira seja imediatamente compensada consoante o comprimento do bico de injeção utilizado.

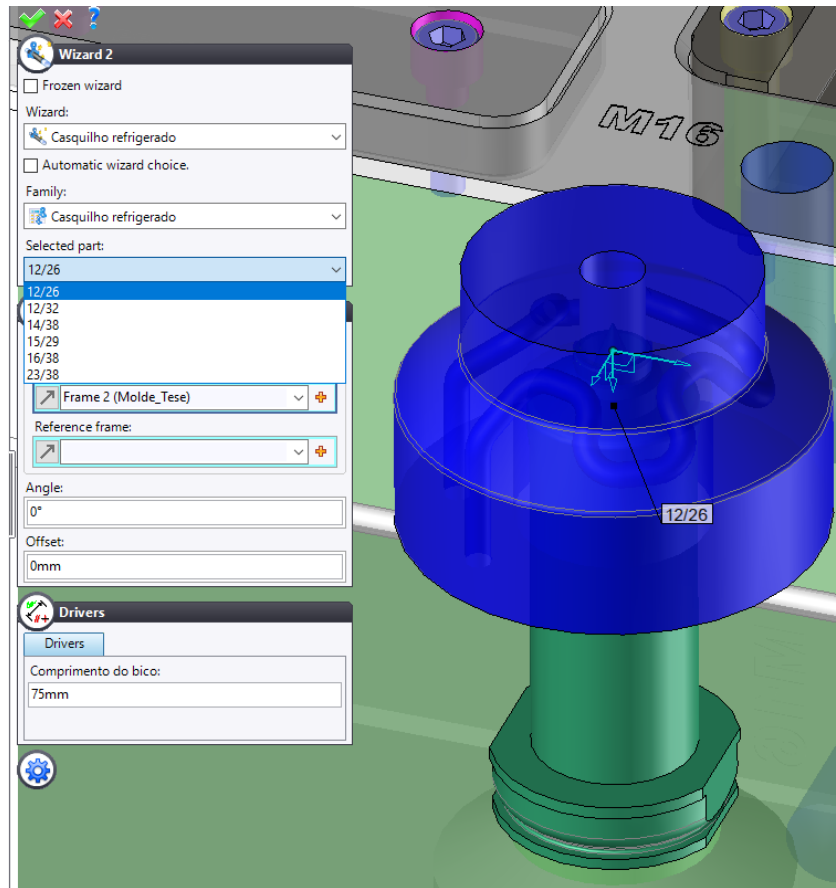


Figura 31: Seleção e inserção do componente no *software* CAD TopSolid 7®.

Desta forma obtém-se o componente totalmente parametrizado do casquilho refrigerado proposto, aplicável em vários bicos de injeção e com a possibilidade de aumentar a gama apenas com a introdução de mais referências na tabela de dados. Na Figura 32 está representado o 2D do modelo original do componente para a referência ST12/26.

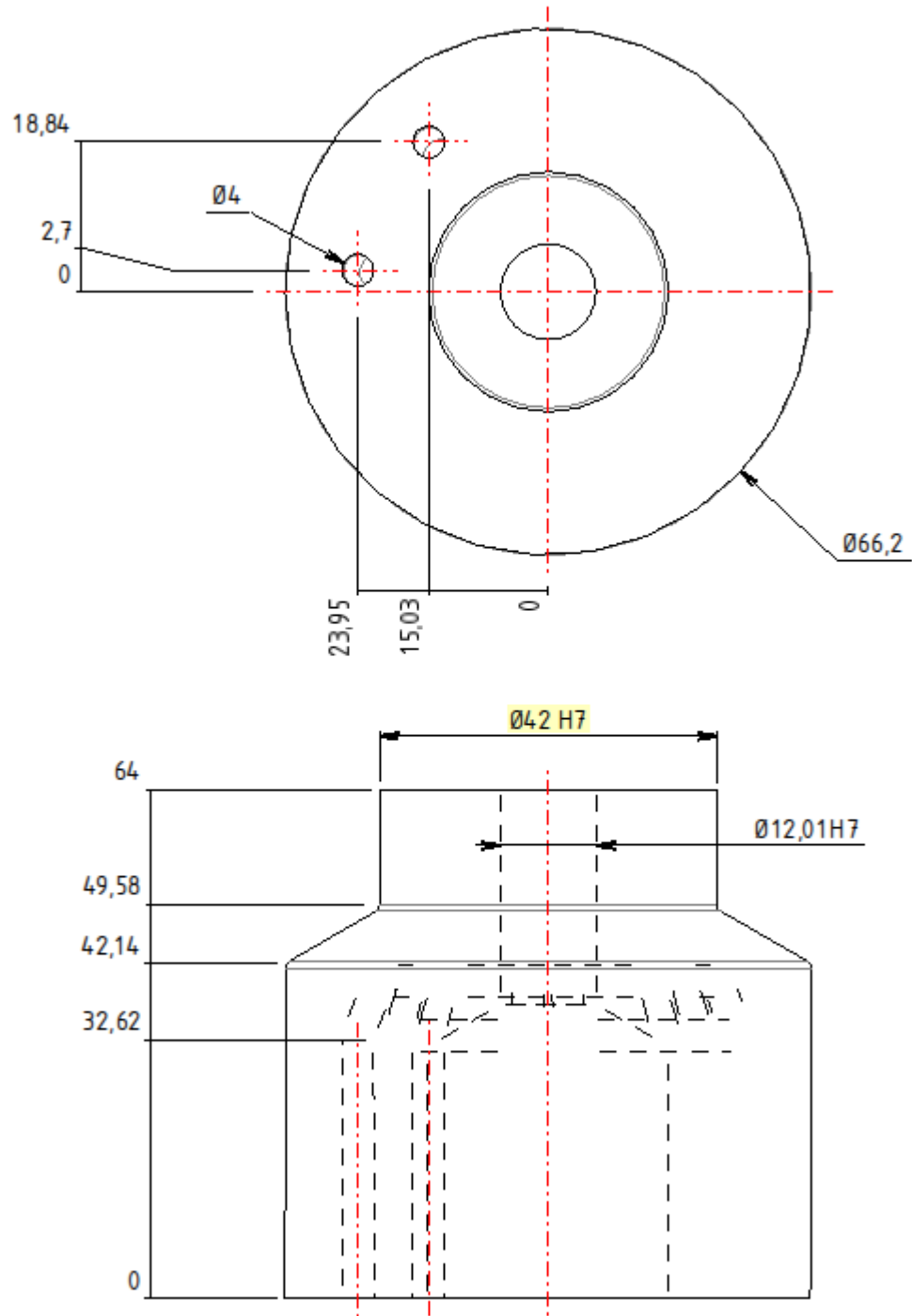


Figura 32: 2D do modelo original do componente para a referência ST12/26.

4.1.2. Seleção do material

Para a seleção do material a utilizar no casquilho refrigerado foram tidas em conta as propriedades dos materiais disponíveis na Tabela 4 do subcapítulo 3.4 e recorreu-se a um método analítico para a obtenção dos índices de desempenho mais adequados para esta aplicação.

Foi considerado como objetivo principal a redução do custo da peça a produzir, tendo sido tidas em conta as seguintes propriedades como restrições:

- Condutividade térmica;
- Rigidez;
- Dureza.

Imediatamente é verificado que dos materiais escolhidos para a seleção, três deles (*LaserForm® 316L (A)*, *LaserForm® 17-4PH (A)* e *LaserForm® Ti Gr5 (A)*) não cumprem as especificações de dureza necessárias para a aplicação, tendo sido eliminados. Em muitos casos as cavidades necessitam de ser temperadas (ex.: 1.2738HH - 44/48 HRC) e, portanto, o material selecionado necessita possuir uma temperabilidade elevada.

A liga de titânio, *LaserForm® Ti Gr5 (A)*, além de não possuir dureza suficiente, não cumpre com a especificação da condutividade térmica, tendo apenas cerca de 7 W/m°C, muito inferior quando comparado com o *LaserForm® Maraging Steel (B)*, por exemplo.

Após estas eliminações, para efetuar a seleção do material recorreu-se à equação de carga crítica para instabilidade elástica numa barra de secção circular sujeita a compressão, considerando a extremidade que sofre a carga como livre:

$$P_{\text{crítico}} = \frac{\pi^2 * E * I}{4 * L^2}$$

Onde,

- E: Módulo de Young ou módulo de elasticidade;
- I: Momento de inércia;
- L: Comprimento da barra.

Considerando o momento de inércia de uma secção circular como sendo:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4}$$

Onde,

- r: Raio da secção circular.

Adaptando ao caso de estudo, obtém-se:

$$I = \frac{\pi r^4}{4} - \frac{\pi (r - t)^4}{4}$$

Onde,

- t: espessura da secção tubular.

Assim sendo, partindo de uma função objetiva de minimização de custo com uma restrição de rigidez, e tendo como base as equações anteriores, obtém-se a seguinte equação:

$$C = C_m * \pi * \left(\frac{16FL^2}{\pi^2 E} \right)^{\frac{1}{2}} * L * \rho$$

Onde,

- C: Custo;
- C_m: Custo por unidade de massa;
- F: Carga aplicada;
- ρ: Densidade do material.

Desta forma obtém-se o índice de desempenho do material:

$$\text{Índice de desempenho} = \frac{E^{1/2}}{C_{v,r}}$$

Onde,

- C_{v,r}: Custo por unidade de volume.

Os resultados tomam a forma de um índice de desempenho, sendo que quanto maior for o valor do índice melhor desempenho o material terá para uma dada aplicação. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Índices de desempenho obtidos.

Ref. ^a do material	Índice de desempenho
LaserForm® Maraging Steel (B)	0,44
LaserForm® CoCrF75 (A)	0,25

Pelo índice de desempenho pode-se considerar o *LaserForm® Maraging Steel (B)* (Anexo III) como o material com as características mais indicadas para o casquilho de refrigeração. As propriedades mecânicas relativas às tensões de cedência e de rotura após fabrico e após tratamento térmico deste aço estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9: Propriedades mecânicas do *LaserForm® Maraging Steel (B)*.

Condição	Propriedades	Valor [MPa]
Após fabrico	Tensão cedência Plano XY	950 ± 60
	Tensão cedência Plano Z	780 ± 60
	Tensão rotura Plano XY	1180 ± 20
	Tensão rotura Plano Z	1050 ± 40
Após tratamento térmico	Tensão cedência Plano XY	1870 ± 80
	Tensão cedência Plano Z	1750 ± 80
	Tensão rotura Plano XY	2190 ± 50
	Tensão rotura Plano Z	2140 ± 50

4.1.3. Análise estrutural

De modo a validar o *design* do casquilho refrigerado e a confirmar que este suportará a pressão de injeção a que será submetido sem comprometer a funcionalidade do mesmo, foi efetuada uma análise estrutural ao componente. Recorreu-se ao *software* FEMAP®.

Para a análise estrutural foram aplicadas cargas e constrangimentos tal como representado na Figura 33, sendo que foram dados como parâmetros de entrada os seguintes:

- Material: 1.2709;
- Cargas: Pressão de 50 MPa;
- Constrangimentos: Foi considerada a base como fixa.

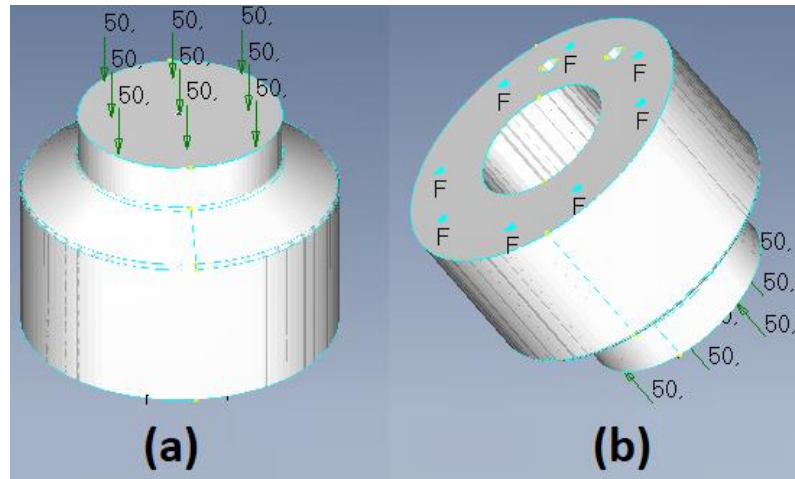


Figura 33: Aplicação de pressão em (a) e constrangimento de fixação em (b).

A pressão utilizada foi de 50 MPa (aproximadamente 500 bar). Foi tido em conta o valor médio de pressão na cavidade de um molde de injeção para a maioria dos polímeros mais utilizados na indústria dos moldes em geral (Granja *et al.*, 2006), (Rosato, 2000).

Analisaram-se dois resultados desta análise:

- Tensões;
- Deslocamento.

Quanto aos valores de tensão (Figura 34), a tensão máxima foi obtida na transição entre a zona de folga e de ajustamento de topo do casquilho refrigerado. O seu valor absoluto máximo foi de cerca de 175 MPa, porém este valor observa-se apenas em um dos pontos desta zona. O valor médio da tensão na zona indicada é de cerca de 140 MPa, valor muito satisfatório, sendo que o valor para a tensão de cedência deste material após fabrico por SLM é de cerca de 800 MPa, enquanto após tratamento térmico pode atingir valores de 1900 MPa, estando os valores de tensão obtidos muito afastados do limite de elasticidade deste aço após processamento. O critério de cedência utilizado foi o de von Mises.

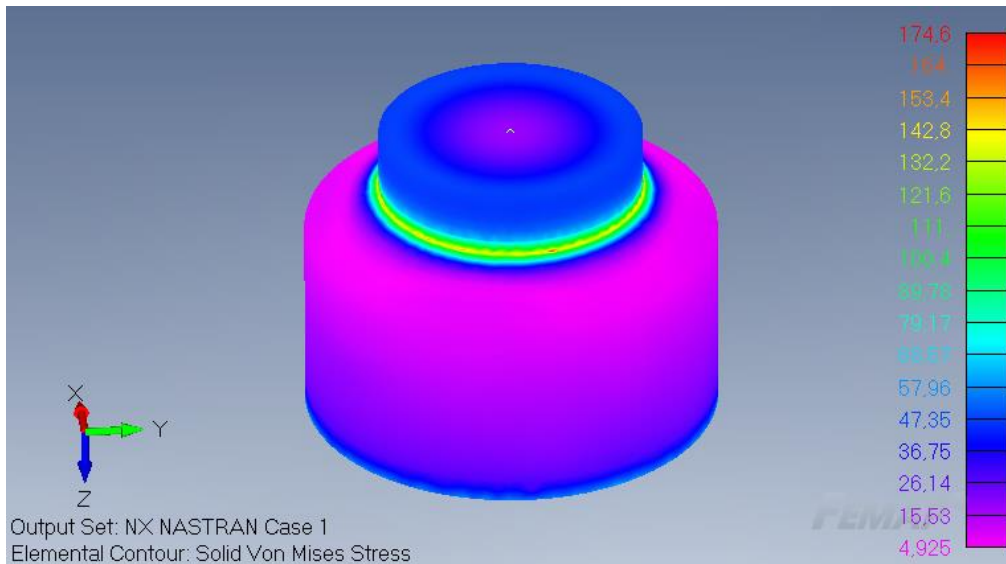


Figura 34: Tensões obtidas pelo critério de von Mises.

Quanto ao deslocamento (Figura 35), o deslocamento máximo obtido foi na zona moldante do casquilho, tendo um valor absoluto máximo de cerca de 0.0115 mm. Na literatura (Rosato, 2000) valores de deslocamento entre 0.025-0.05 mm em paredes de molde são valores comuns e aceitáveis nesta indústria, pelo que os resultados obtidos nesta simulação são muito satisfatórios para este tipo de aplicação.

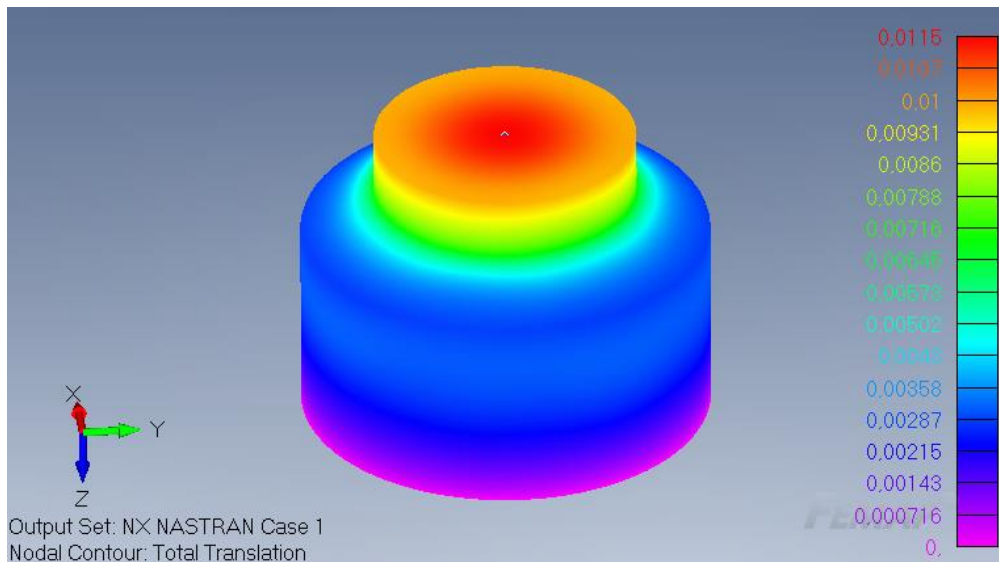


Figura 35: Deslocamento total.

Analisando ao pormenor o deslocamento (Figura 36) na zona dos canais de refrigeração é possível verificar que estes são pouco afetados pela pressão colocada no inserto.

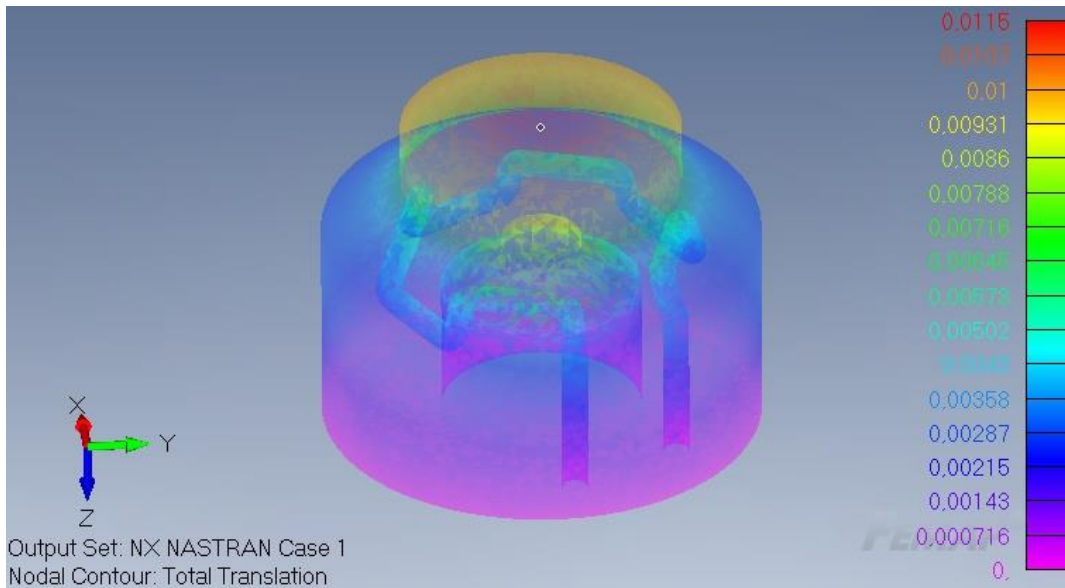


Figura 36: Deslocamento total com pormenorização dos canais de refrigeração.

4.1.4. Otimização topológica

De forma a explorar de forma mais abrangente a tecnologia aditiva recorreu-se a um *software* de otimização topológica para criar um conceito de *design* otimizado com vista a uma redução de massa do componente, mantendo as geometrias essenciais ao seu funcionamento (Figura 37), neste caso os canais conformáveis e a zona de material reservada para a zona moldante.

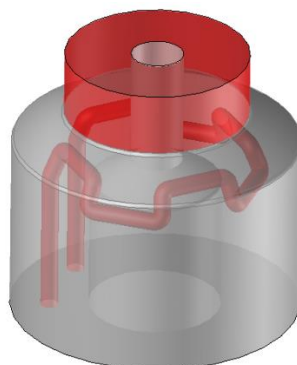


Figura 37: Zonas protegidas durante a simulação de otimização topológica assinaladas a vermelho.

O estudo foi efetuado tendo como dados de entrada os seguintes parâmetros:

- Material: 1.2709;
- Pressão aplicada: 50 MPa;
- Tensão de cedência: 1875 MPa;
- Fator de segurança: 1.5;
- Tensão limite de segurança: 1250 MPa;
- Objetivo: Aumento de rigidez da peça.

Numa primeira fase realizou-se uma redução de 35% da massa da peça, tal pode ser observado na Figura 38. É possível verificar que o material à volta do casquilho é possível de remover sem criar qualquer mau funcionamento estrutural do componente.

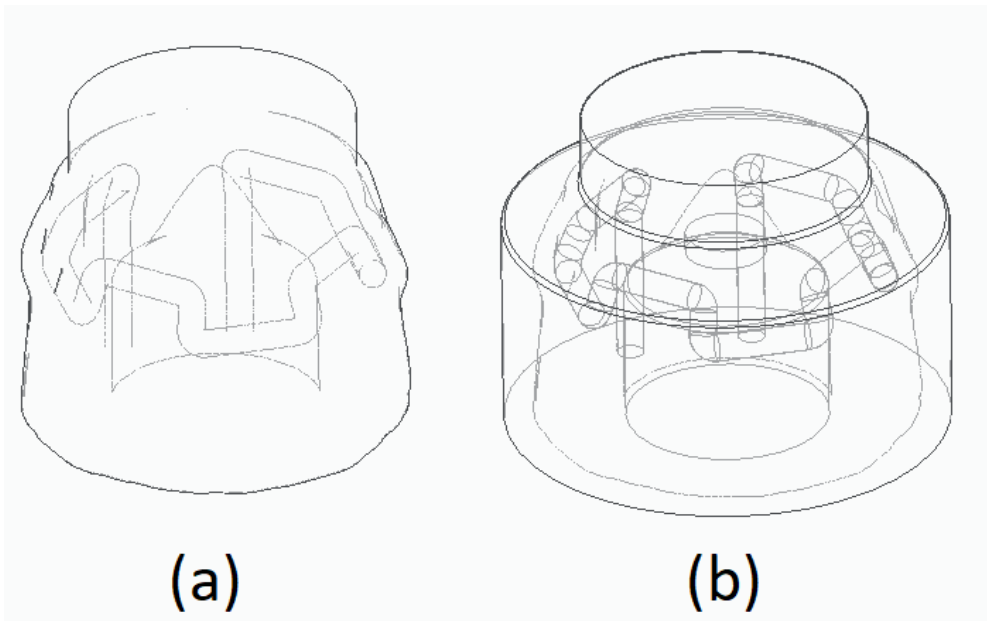


Figura 38: Conceito do modelo otimizado da peça (a) e sobreposição do conceito do modelo otimizado com a peça original (b) com uma redução de massa de 35%.

Posteriormente foi realizada novamente uma otimização topológica, mas desta vez com uma redução de massa em 50% (Figura 39). A tendência de remover o material envolvente do casquilho mantém-se, sendo que é visível a necessidade de manter maior nível de espessura de material em algumas zonas da base do componente.

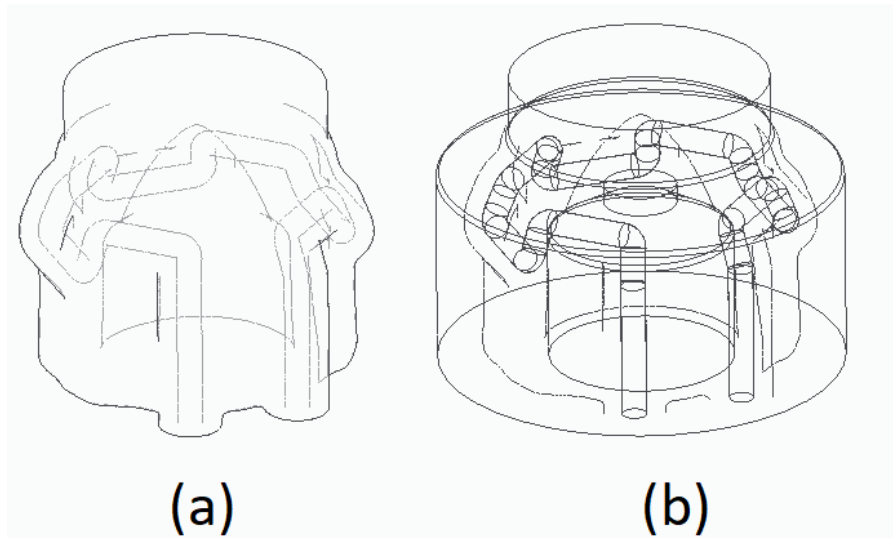


Figura 39: Conceito do modelo otimizado da peça (a) e sobreposição do conceito do modelo otimizado com a peça original (b) com uma redução de massa de 50%.

Finalmente realizou-se uma otimização topológica com uma redução em 75% da massa da peça original (Figura 40), a máxima permitida pelo *software* para esta peça. Com esta redução finalmente são definidas as zonas críticas da base do componente que necessitam de possuir massa de modo a que o componente não entre em decadência estrutural.

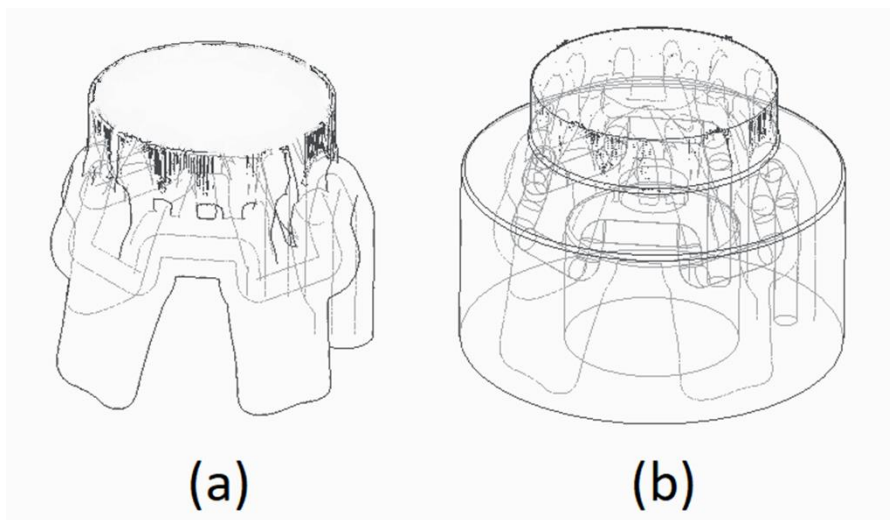


Figura 40: Conceito do modelo otimizado da peça (a) e sobreposição do conceito do modelo otimizado com a peça original (b) com uma redução de massa de 75%.

Desta forma foi possível comparar as três hipóteses em estudo (Figuras 41 e 42) e decidir qual das três se adequa mais para o componente em questão.

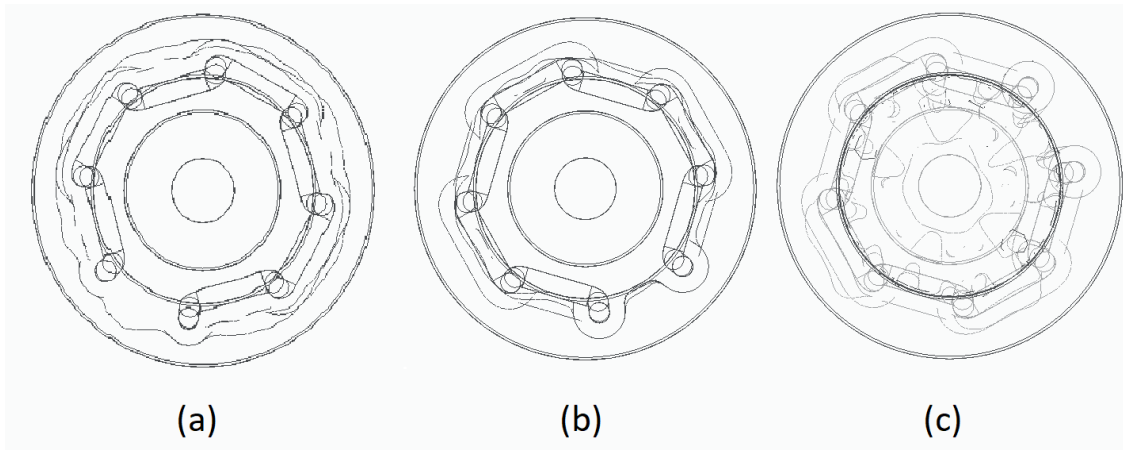


Figura 41: Vista de topo do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 75% (c).

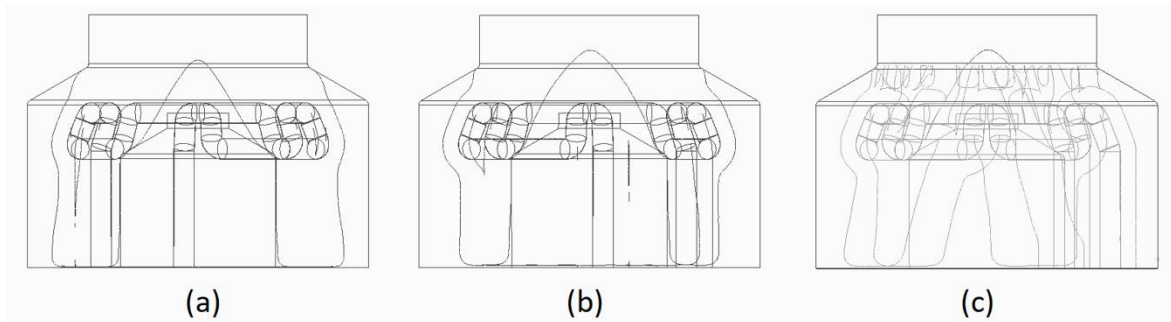


Figura 42: Vista lateral do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 75% (c).

Sendo a redução em 75% de massa da peça (Figura 43) a hipótese mais interessante das três, pela quantidade de material removido, decidiu-se avançar com a modificação da geometria da peça tendo em conta o conceito do modelo produzido através da otimização topológica.

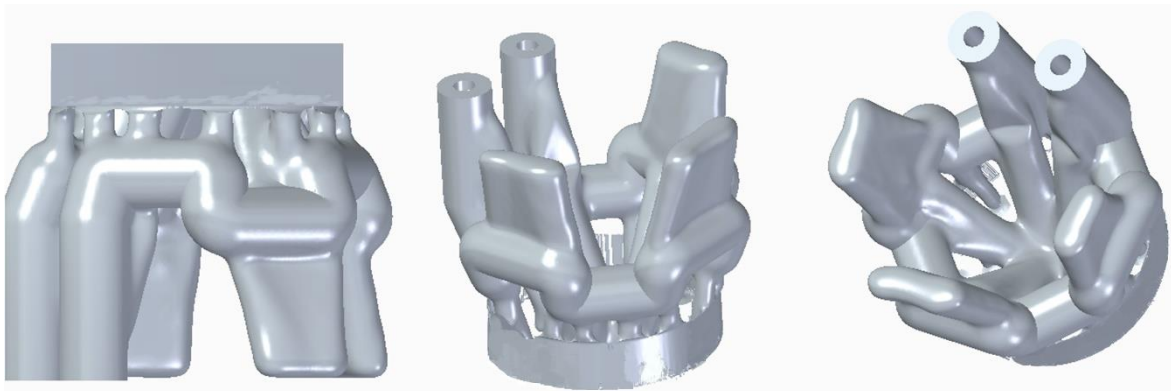


Figura 43: Vistas do 3D do conceito de design otimizado gerado com uma redução de massa de 75%.

Deste modo avançou-se para a alteração do *design* da peça tendo em conta o conceito otimizado gerado pela otimização topológica, tendo sido obtido a peça representada nas Figuras 44 e 45.

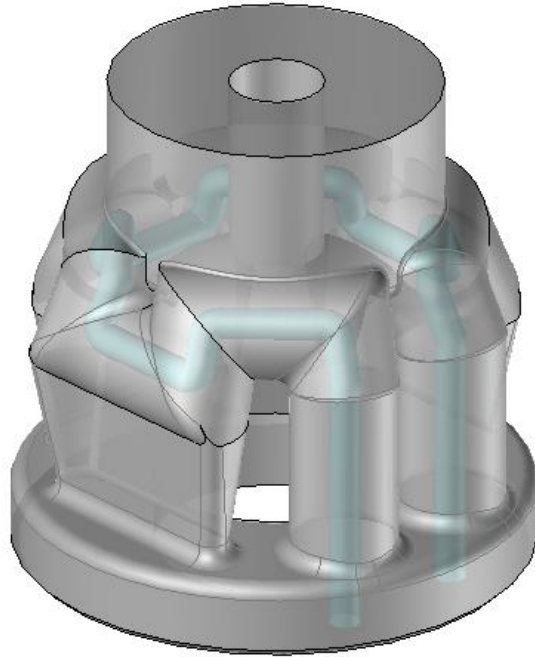


Figura 44: Vista isométrica do 3D do casquilho refrigerado otimizado.

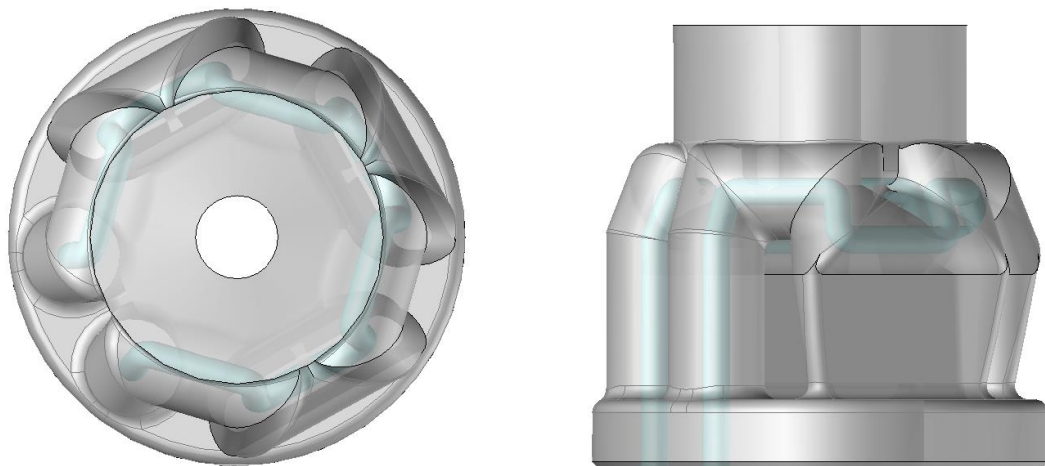


Figura 45: Vista de topo e lateral do 3D do casquilho refrigerado otimizado.

Tendo em consideração uma produção híbrida do componente, foi desenvolvida ainda uma alteração ao *design* do componente topologicamente otimizado. Desta forma obteve-se um

Modelo Híbrido Topologicamente Otimizado (Figura 46). O 2D do componente final está apresentado no Anexo I.

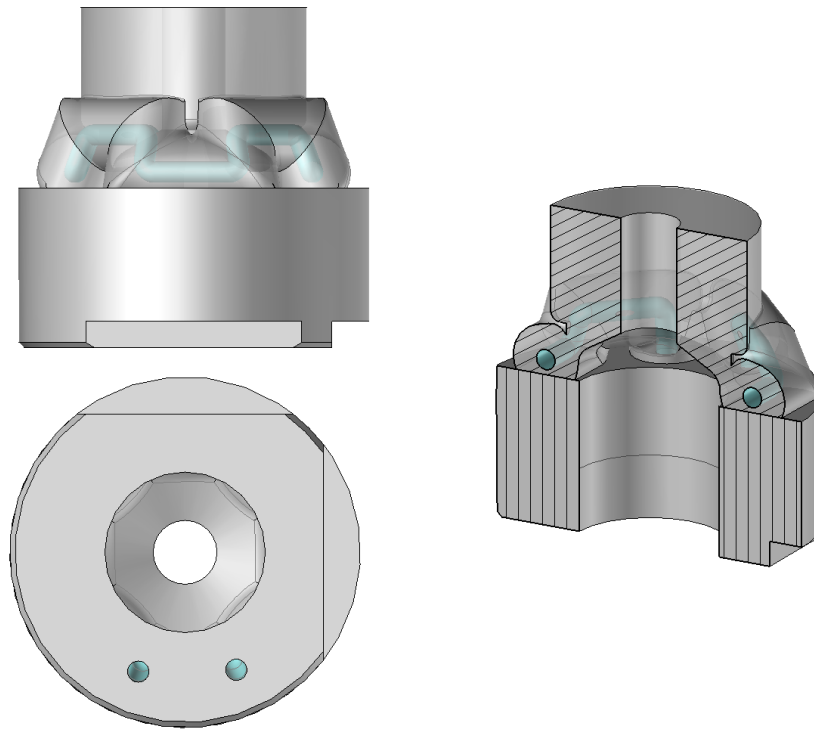


Figura 46: Modelo Híbrido Topologicamente Otimizado.

4.1.5. Montagem do componente

Relativamente à montagem do componente, é possível verificar que o espaço necessário para o casquilho refrigerado é muito inferior ao espaço ocupado pelas soluções atuais existentes no mercado ou insertos realizados pelas empresas construtoras de moldes internamente, sendo esta uma grande vantagem deste componente.

Pela Figura 47 é possível verificar o espaço necessário para a aplicação de uma solução semelhante ao casquilho refrigerado num molde de modo a permitir uma refrigeração convencional nessa zona. Para além da grande quantidade de espaço ocupado pela solução, espaço esse que terá necessariamente de ser fresado, causando aumento de custos, é possível verificar a quantidade de componentes de refrigeração necessários para a montagem da solução de refrigeração representada.

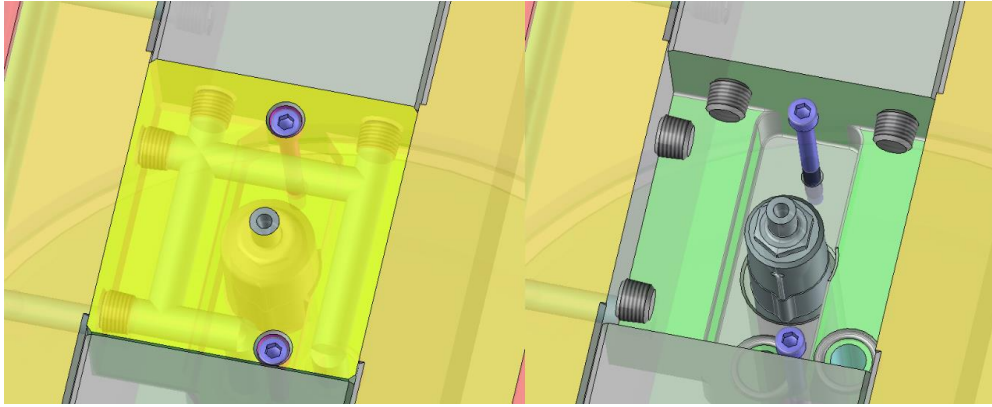


Figura 47: Composição convencional de uma refrigeração de um bico de injeção.

Pelo contrário, o componente desenvolvido necessita de uma muito menor quantidade de componentes de refrigeração e ocupa uma muito menor quantidade de espaço (Figura 48), reduzindo assim os custos de fresagem. Para além disso não compromete tanto a estabilidade estrutural do molde ao não remover uma quantidade substancial de aço.

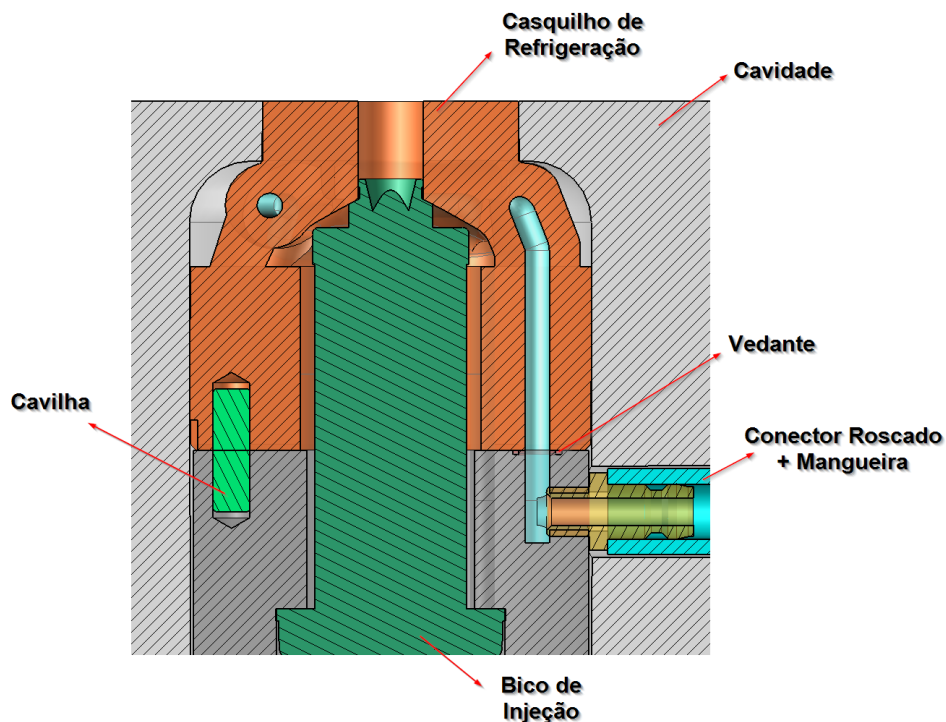


Figura 48: Exemplo genérico de aplicação do casquilho refrigerado.

Por outro lado, em casos onde não se implementam soluções de componentes de refrigeração, são utilizados apenas furos de água na cavidade (Figura 49). Nestes casos é necessário manter alguma distância de segurança das zonas moldantes e do próprio bico de injeção.

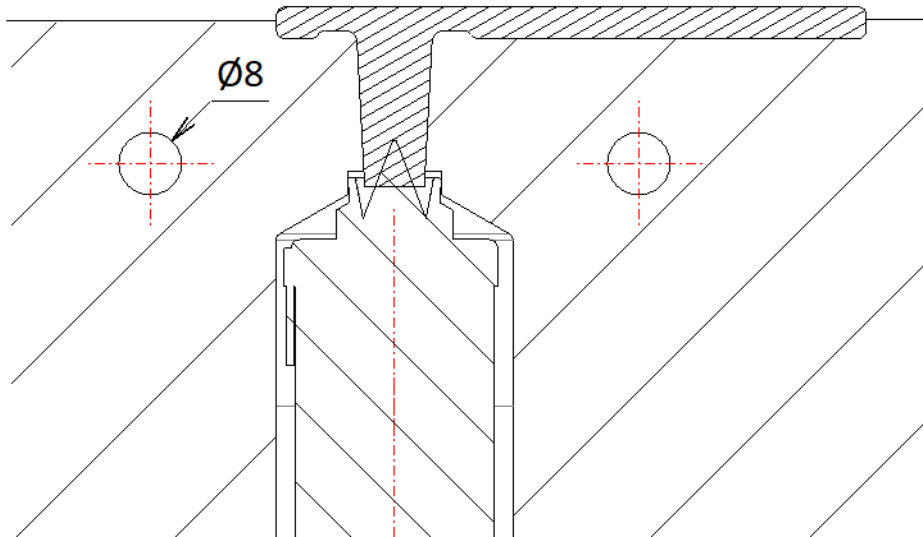


Figura 49: Refrigeração convencional do local de injeção.

Recorrendo ao componente desenvolvido (Figura 49) e comparando com a solução da Figura 50 é possível verificar uma vantagem imediata face às soluções convencionais. A proximidade dos canais de refrigeração à zona moldante é muito maior nesta solução quando comparada com a solução convencional. Nos capítulos seguintes verificar-se-á se esta premissa é realmente vantajosa.

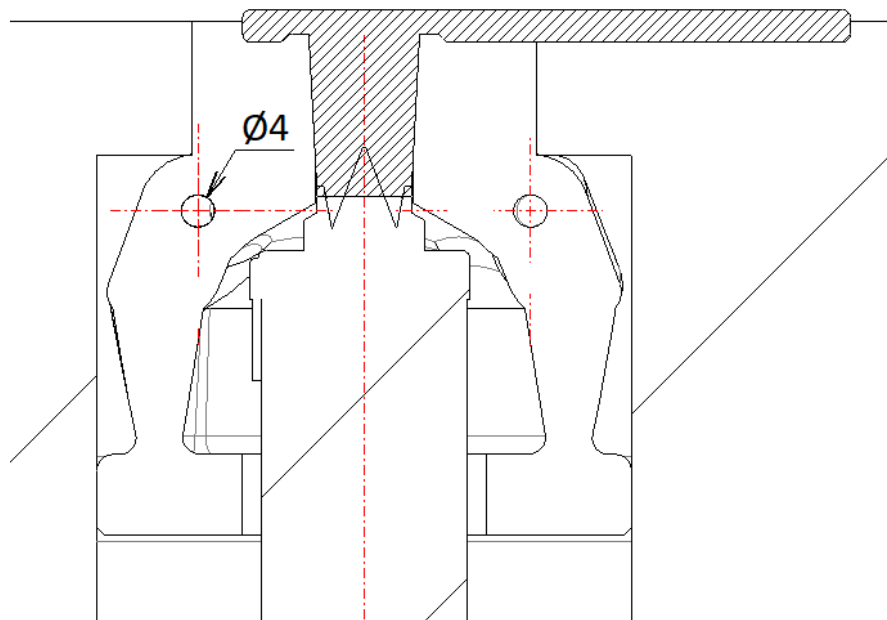


Figura 50: Utilização do componente desenvolvido.

4.2. Desenvolvimento do inserto de injeção “banana”

Tal como no componente anterior, o *design* do inserto de injeção em “banana” teve dois passos:

- Parametrização de todas as dimensões de modo a criar uma gama normalizada;
- Parametrização do sólido correspondente ao jito e à injeção em “banana”.

4.2.1. Parametrização

De modo a parametrizar este componente dividiu-se a fase de criação em três etapas, tal como aconteceu na parametrização do componente anterior:

- 1ª Criação do inserto de injeção;
- 2ª Criação da injeção em formato de “banana” e do jito;
- 3ª Identificação da forma de fixação do inserto.

O corpo do inserto foi desenhado de forma muito simples, basicamente criando parâmetros para a base e para a altura do bloco. Foram dados ângulos de saída de modo a facilitar a montagem do inserto na caixa que terá de ser maquinada no molde.

Na Tabela 10 encontram-se os valores referentes ao corpo do inserto, estes parâmetros são apenas de entrada, sendo eles:

- B: Largura da base do inserto;
- L: Comprimento da base do inserto;
- H1: Altura do inserto até ao ponto de inserção da injeção;
- H2: Altura de material acima do ponto de inserção da injeção;
- FIP: Espaço entre ponto de injeção e face exterior do inserto;

Tabela 10: Parâmetros de entrada das dimensões do corpo do inserto de injeção.

Ref. ^a	B [mm]	L [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	Htotal [mm]
ST20/30	20	30	30	5	35
ST26/30	26	30	30	5	35
ST30/40	30	40	40	5	45
ST36/40	36	40	40	5	45
ST40/50	40	50	50	5	55
ST46/50	46	50	50	5	55

Quanto à injeção em formato “banana”, esta foi desenhada recorrendo a uma série de operações geométricas. Todos os valores das dimensões destas geometrias foram parametrizados (Figura 51), desde os arcos que formam a curvatura da injeção em “banana” até aos diâmetros de entrada e de saída da injeção.

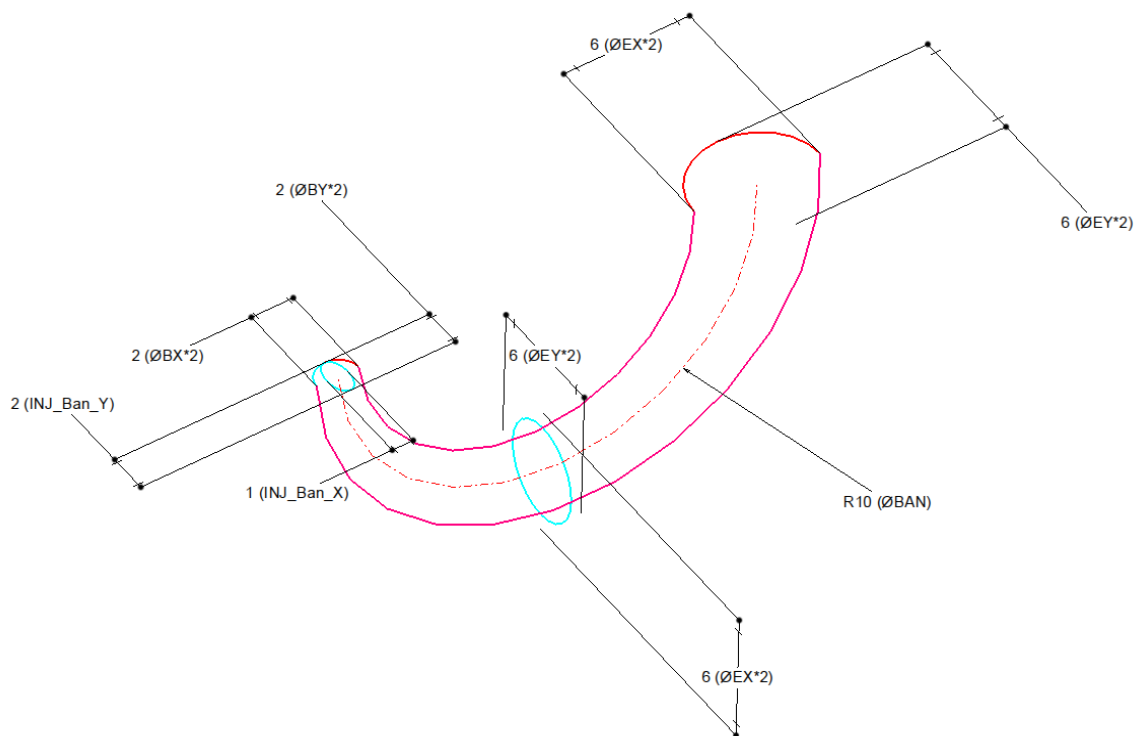


Figura 51: Definição de parâmetros do canal de injeção.

O canal de alimentação frio foi desenhado com uma secção trapezoidal (Figura 52). Este formato foi selecionado por ser o mais fácil de fresar – na bucha onde este inserto será colocado terá de ser fresado um canal frio com as mesmas dimensões que o existente no inserto. Ao recorrer a esta secção pode-se recorrer a uma fresa de topo raso. Operar com este

tipo de fresa é muito mais barato e mais rápido face a operações com outros tipos de ferramenta, sendo apenas necessário fazer um pequeno raio no fundo do canal.

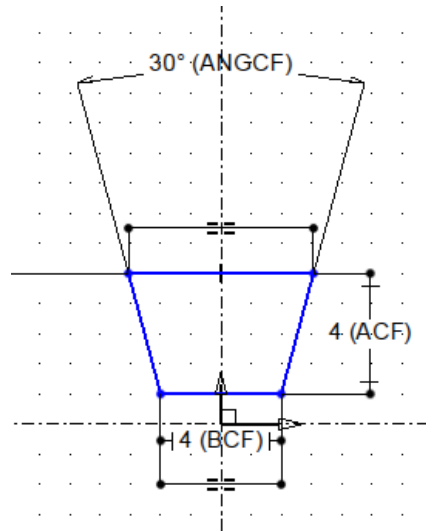


Figura 52: Definição da secção do canal de alimentação frio.

A pensar na gama normalizada do componente foram seleccionadas algumas dimensões para a secção do canal de alimentação frio e para o ponto de injeção. O sólido resultante destas operações (Figura 53) resulta no sólido que se irá subtrair ao corpo do inserto.

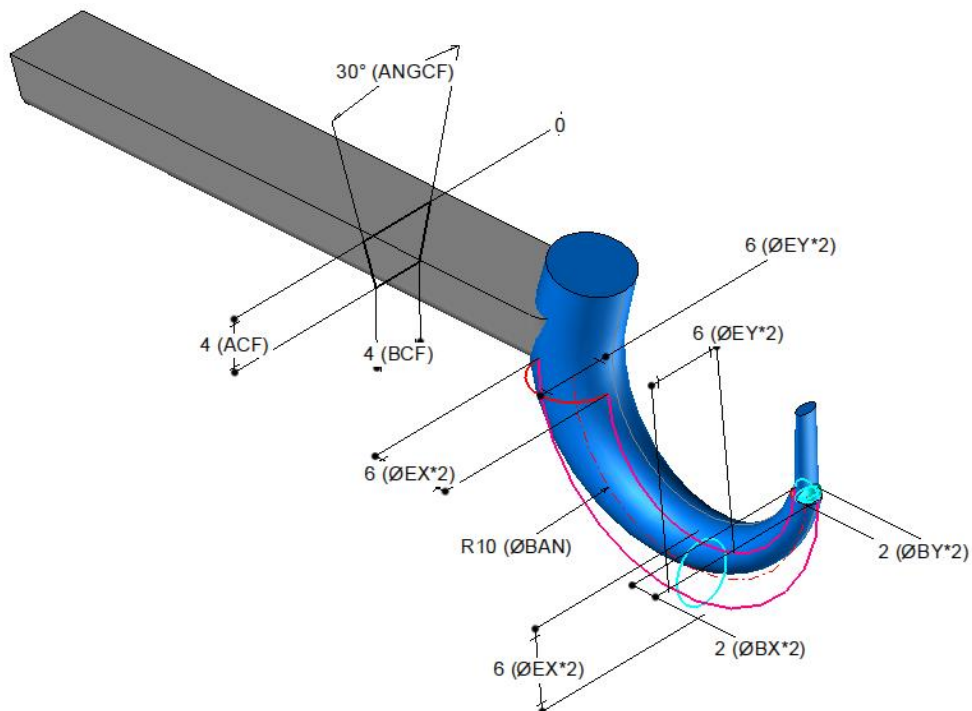


Figura 53: Definição de parâmetros finais do jito frio.

De modo a calcular o diâmetro efetivo de injeção, importante para o processo de injeção pois este está diretamente ligado à velocidade e pressão no ponto de injeção, calculou-se o diâmetro hidráulico (White, 2011) das secções utilizadas no jito, ou seja, no canal de alimentação frio e no ponto de injeção. Estes valores são apresentados na Tabela 11 e a fórmula utilizada para o seu cálculo foi a seguinte:

$$\varnothing \text{ Hidráulico} = \frac{4 \cdot A}{P}$$

Onde,

- A: Área da secção molhada;
- P: Perímetro da secção molhada.

Tabela 11: Valores de diâmetro hidráulico para as diferentes referências de canal de alimentação frio.

Ref. ^a	ACF [mm]	BCF [mm]	ANGCF [°]	Ø Hidráulico [mm]
A	3	3	20	3,0
B	4	4	20	4,5
C	6	5	20	6,0
D	8	7	20	8,0
E	9	8	20	9,0
F	10	8	20	10,0
G	12	10	20	12,0
H	14	12	20	14,0

O ponto de injeção foi criado com dois parâmetros tendo novamente em conta a gama normalizada do componente. Deste modo foram selecionadas duas opções de seleção para a secção do ponto de injeção – secção circular (Figura 54) e secção elipsoidal (Figura 55). Para ambas secções foram selecionadas dimensões de modo a obter um diâmetro de injeção dentro da gama dos mais utilizados na indústria. Estes valores são apresentados nas Tabelas 12 e 13.

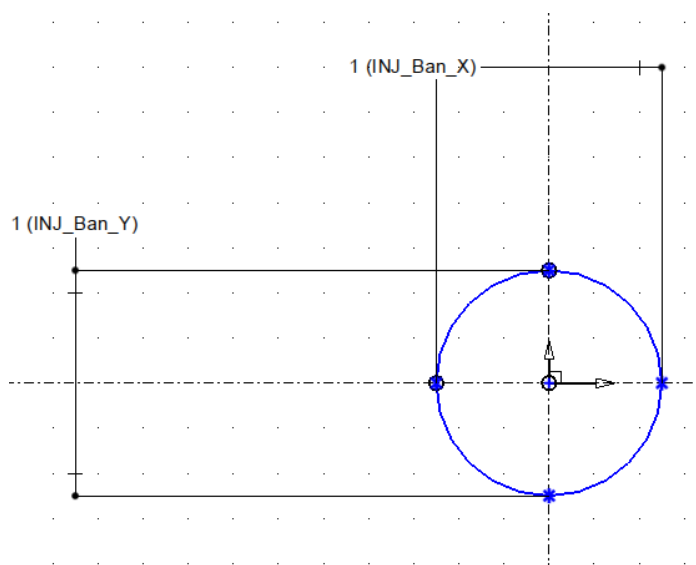


Figura 54: Definição do ponto de injeção de secção circular.

Tabela 12: Parâmetros de entrada para definição do diâmetro de injeção efetivo de secção circular.

Ref. ^a	INJ_Ban_X [mm]	INJ_Ban_Y [mm]	Ø Hidráulico [mm]
C06	0,6	0,6	0,6
C08	0,8	0,8	0,8
C10	1	1	1
C12	1,2	1,2	1,2
C15	1,5	1,5	1,5
C18	1,8	1,8	1,8
C20	2	2	2
C22	2,2	2,2	2,2
C24	2,4	2,4	2,4
C26	2,6	2,6	2,6
C30	3	3	3
C32	3,2	3,2	3,2
C34	3,4	3,4	3,4
C36	3,6	3,6	3,6
C40	4	4	4

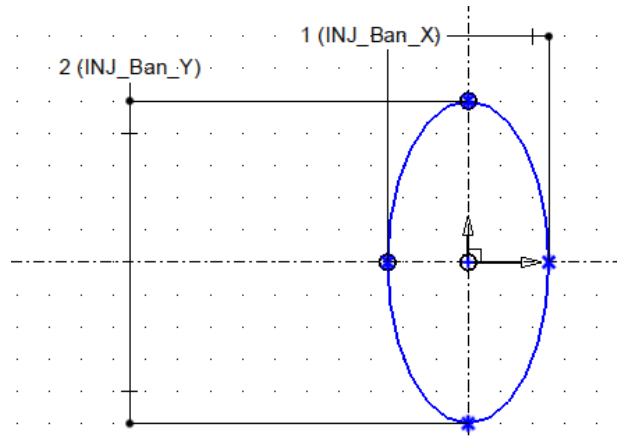


Figura 55: Definição do ponto de injeção de secção elipsoidal.

Tabela 13: Parâmetros de entrada para definição do diâmetro de injeção efetivo de secção elipsoidal.

Ref. ^a	INJ_Ban_X [mm]	INJ_Ban_Y [mm]	Ø Hidráulico [mm]
E10Y6	0,6	6	1,0
E12Y6	0,8	6	1,2
E15Y6	1	6	1,5
E10Y8	0,6	8	1,0
E12Y8	0,8	8	1,2
E15Y8	1	8	1,5
E18Y8	1,2	8	1,8
E10Y10	0,6	10	1,0
E12Y10	0,8	10	1,2
E15Y10	1	10	1,5
E18Y10	1,2	10	1,8
E20Y10	1,4	10	2,0
E24Y10	1,6	10	2,4
E26Y10	1,8	10	2,6
E30Y10	2	10	3,0
E12Y12	0,8	12	1,2
E15Y12	1	12	1,5
E18Y12	1,2	12	1,8
E20Y12	1,4	12	2,0
E24Y12	1,6	12	2,4
E26Y12	1,8	12	2,6
Y30Y12	2	12	3,0

Deste modo, um utilizador ao necessitar de um inserto de injeção com diâmetro equivalente igual a 2 mm, com secção elipsoidal, seleccionaria, por exemplo, a referência “E20Y10”. Além disso, com um canal frio de alimentação de secção trapezoidal de 10 mm de altura por 8 mm de largura na base com ângulo entre paredes de 20°, seleccionaria a referência “F”. Face ao espaço disponível no molde seleccionaria um inserto com dimensões de 40x50x55 mm, por exemplo, seleccionando a referência “ST40/50”. Assim, deste modo, seleccionaria como componente a referência “ST40/50.E20Y10.F” (Figura 56), esta será definida pela parametrização do componente, aparecendo de forma automática na lista de materiais do molde em questão, aquando da sua aplicação em projeto.

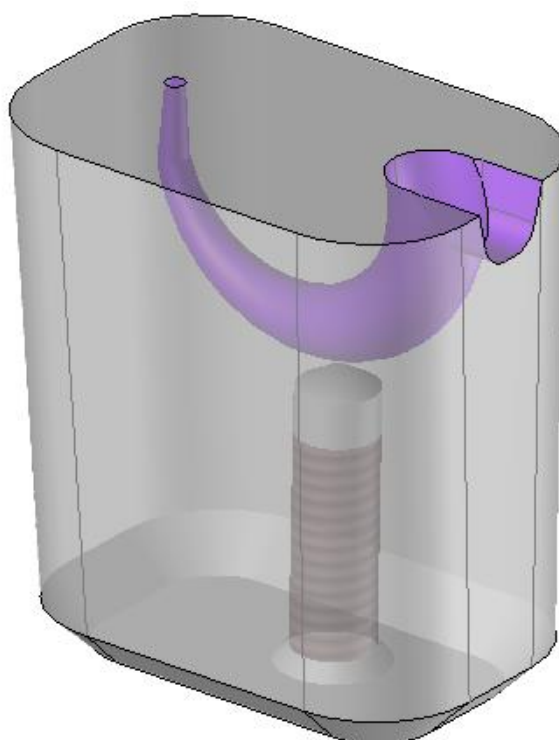


Figura 56: Componente “inserto de injeção” completamente parametrizado.

De modo a fixar o inserto de injeção foram seleccionados parafusos sextavados de cabeça cilíndrica como a melhor forma para fixar este tipo de componente. Dependendo da dimensão do inserto, o parafuso varia entre rosca M5 e M6. A tabela de dados existente no *software* CAD (Figura 57) pode ser facilmente editada e a gama do componente facilmente alargada.

Code	B	L	H1	H2	BCF	ACF	ØBX	ØBY	ØEX
ST10/20	20mm	30mm	30mm	5mm	4mm	4mm	1mm	1mm	3mm
ST12/30	26mm	30mm	30mm	5mm	4mm	4mm	1mm	1mm	3mm
ST30/40	30mm	40mm	40mm	5mm	6mm	6mm	1mm	1mm	4mm
ST36/60	36mm	40mm	40mm	5mm	6mm	6mm	1mm	1mm	4mm
ST40/60	40mm	50mm	50mm	5mm	8mm	8mm	1mm	1mm	5mm
ST46/80	46mm	50mm	50mm	5mm	8mm	8mm	1mm	1mm	5mm

Figura 57: Tabela de dados do inserto de injeção do tipo “banana” no software TopSolid 7®.

Criado o componente é possível aplicá-lo em qualquer molde bastando seleccionar a referência (Figura 58) que melhor se aplique à situação da aplicação. A aplicação do componente é efetuada pelo ponto de injeção e a referência do componente é facilmente editável após inserção do componente.

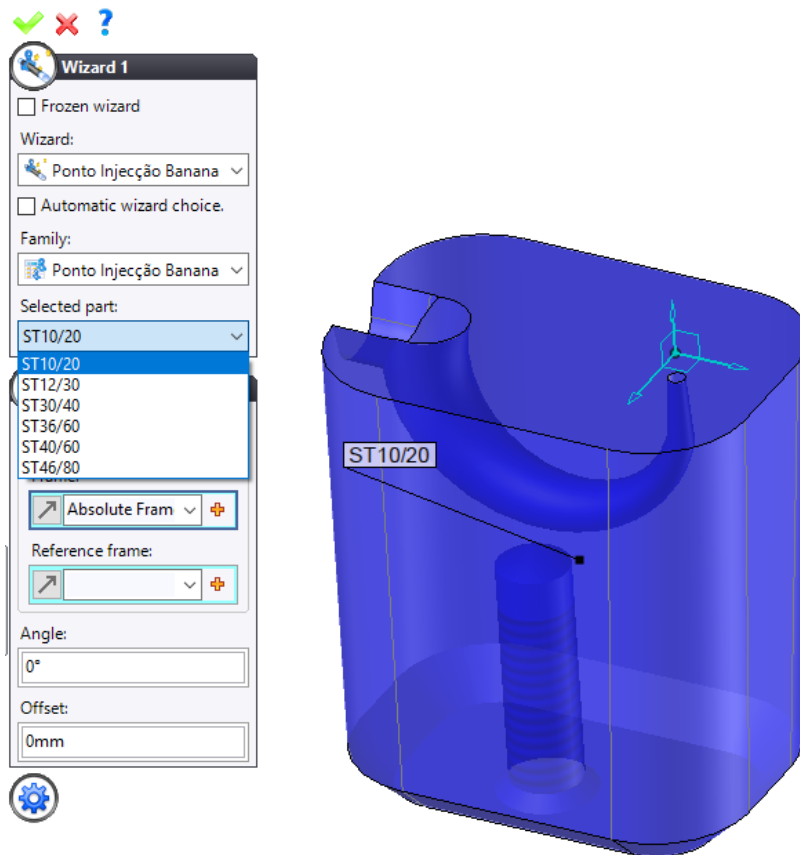


Figura 58: Inserção do modelo 3D do inserto de injeção no TopSolid 7®.

4.2.2. Seleção do material

Da mesma forma que se procedeu para a seleção do material do primeiro componente, calculou-se o índice de desempenho de cada material para o inserto de injeção.

Foi considerado como objetivo principal a redução do custo da peça a produzir, tendo sido tido em conta as seguintes propriedades como restrições:

- Comportamento para fresagem;
- Rigidez;
- Dureza.

Tal como para o primeiro componente, fez-se uma simplificação da forma do inserto. Foi considerado um sólido retangular com solicitação de pressão na face de topo, sendo que apenas foi necessário alterar a fórmula do momento de inércia.

Não tendo o momento de inércia influência direta na equação do índice de desempenho, este mantém-se o mesmo para este componente. Assim sendo, tal como para o primeiro componente foi selecionado o *LaserForm® Maraging Steel (B)* como material.

4.2.3. Análise estrutural

Tal como realizado para o primeiro componente, de modo a validar o *design* do inserto de injeção e a confirmar se este suportará a pressão de injeção a que será submetido sem comprometer a funcionalidade do mesmo, realizou-se uma análise estrutural ao componente.

Para a análise foram dados como parâmetros de entrada os seguintes:

- Material: 1.2709;
- Cargas: Pressão de 50 MPa;
- Constrangimentos: O furo roscado foi considerado como fixo.

A pressão utilizada foi novamente de 50 MPa pelas mesmas razões indicadas no subcapítulo 4.1.3.

Analisaram-se dois resultados desta análise:

- Tensões;
- Deslocamento.

Quanto aos valores de tensão obtidos (Figura 59), a tensão máxima foi obtida na zona do chanfro da base do inserto, não sendo uma zona crítica. O seu valor absoluto máximo foi cerca de 320 MPa, porém este valor observa-se, tal como referido, numa zona não crítica. O valor médio da tensão obtido no componente é de cerca de 50 MPa, valor muito satisfatório, estando os valores de tensão obtidos muito afastados do limite de elasticidade deste aço após processamento. O critério de cedência considerado foi o critério de von Mises.

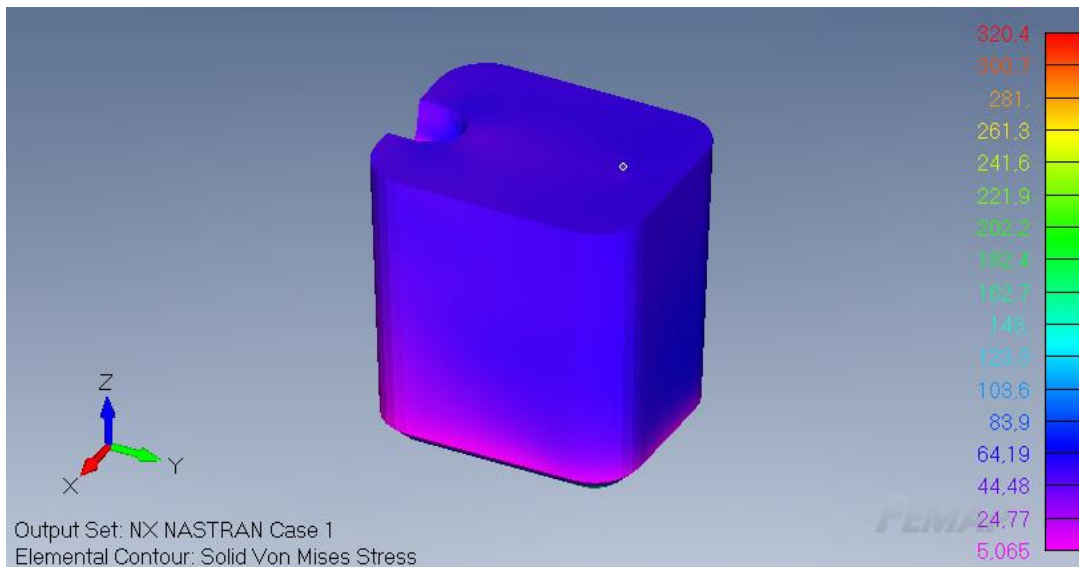


Figura 59: Tensões obtidas pelo critério de von Mises.

Quanto ao deslocamento (Figura 60), o deslocamento máximo obtido foi na zona moldante do inserto, tendo sido obtido um valor absoluto máximo de cerca de 0.0186 mm, valor razoável para este tipo de aplicação.

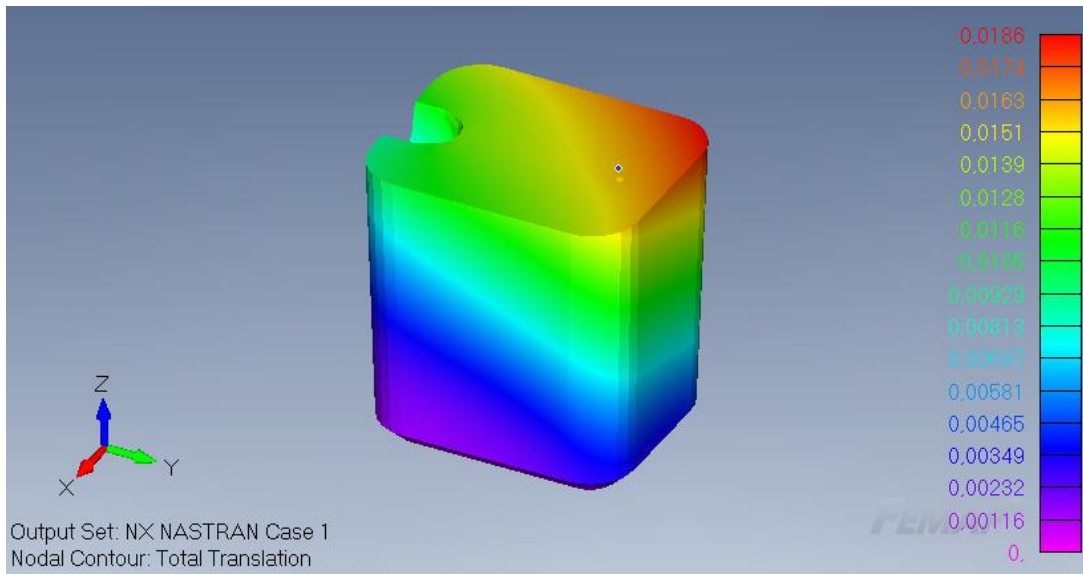


Figura 60: Deslocamento total.

Na zona do canal de injeção (Figura 61) o deslocamento encontra-se com valores médios próximos dos 0.0115 mm, não sendo valores significativos face ao tipo de aplicação.

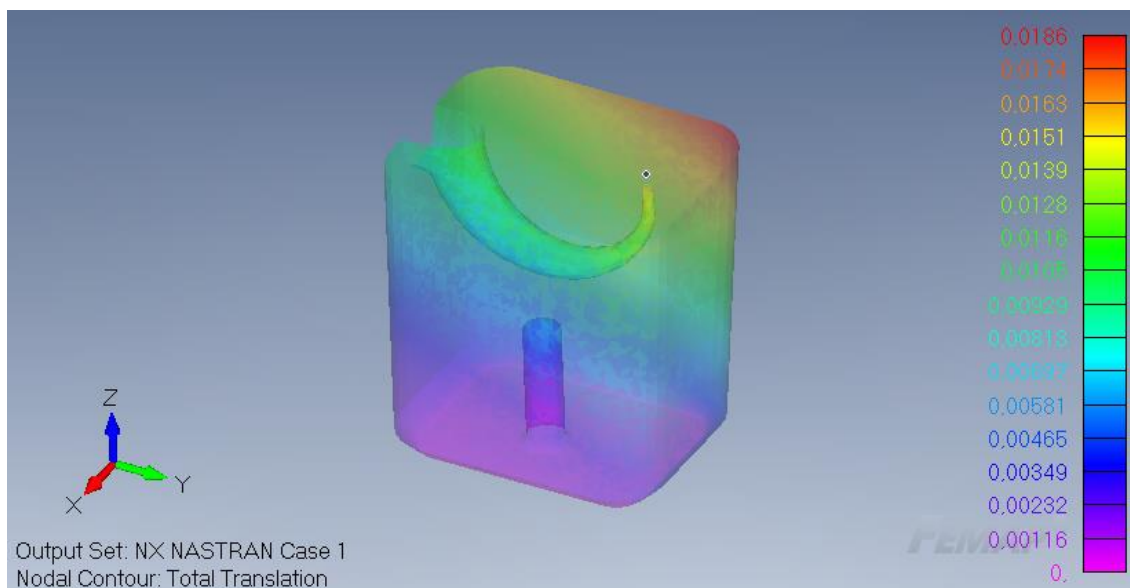


Figura 61: Deslocamento total com pormenorização do canal de injeção.

4.2.4. Otimização topológica

Tal como feito no primeiro componente efetuou-se uma otimização topológica de modo a identificar quais as zonas da peça onde é possível remover massa sem influenciar negativamente o comportamento da peça face às cargas de pressão a que esta é solicitada. Quanto às zonas protegidas que se irão manter no componente foram selecionados o canal de injeção em “banana”, a superfície de topo do inserto e o furo roscado para fixação do mesmo (Figura 62).

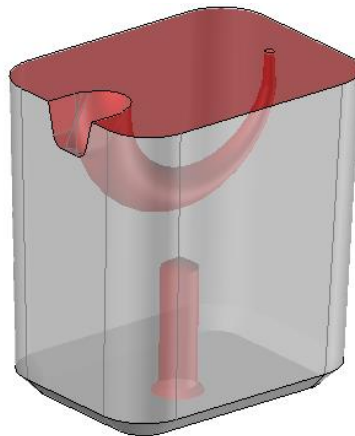


Figura 62: Zonas protegidas durante a simulação de otimização topológica assinaladas a vermelho.

O estudo foi efetuado tendo como dados de entrada os seguintes parâmetros:

- Material: 1.2709;
- Pressão aplicada: 50 MPa;
- Tensão de cedência: 1875 MPa;
- Fator de segurança: 1.5;
- Tensão limite de segurança: 1250 MPa;
- Objetivo: Aumento de rigidez da peça.

Numa primeira fase realizou-se uma redução de 35% da massa da peça, tal pode ser observado na Figura 63. É possível verificar que é possível remover o material à volta e no interior do inserto, na zona central do topo da peça, sem criar qualquer mau funcionamento estrutural do componente.

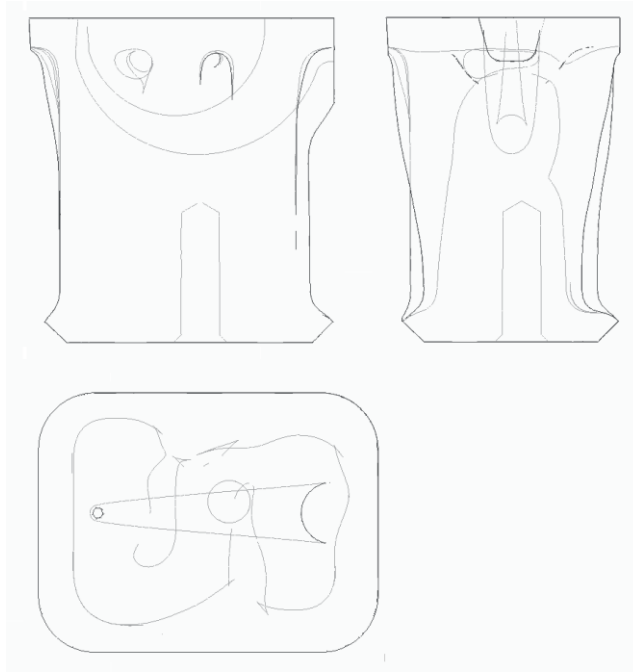


Figura 63: Conceito do modelo otimizado da peça com uma redução de massa de 35%.

Posteriormente foi realizada novamente uma otimização topológica, mas desta vez com uma redução de massa em 50% (Figura 64). A tendência de remover o material envolvente e do interior do topo do inserto mantém-se.

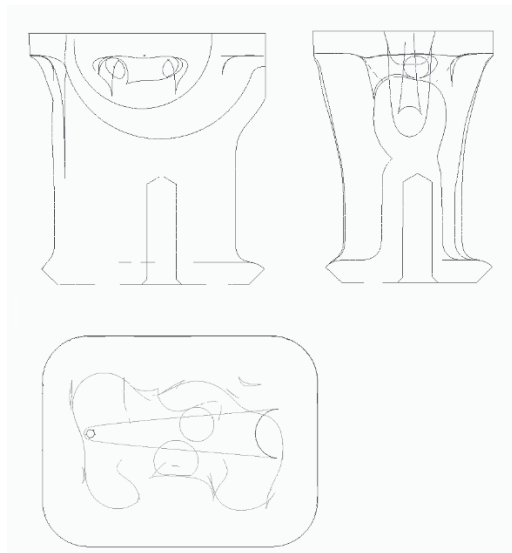


Figura 64: Conceito do modelo otimizado da peça com uma redução de massa de 50%.

Finalmente realizou-se uma otimização topológica com uma redução em 65% da massa da peça original (Figura 65), o máximo permitido pelo *software* para esta peça. Com esta redução finalmente são definidas as zonas críticas da base do componente e do topo da peça,

acima do canal de injeção, que necessitam de possuir massa de modo a que o componente não entre em decadência estrutural.

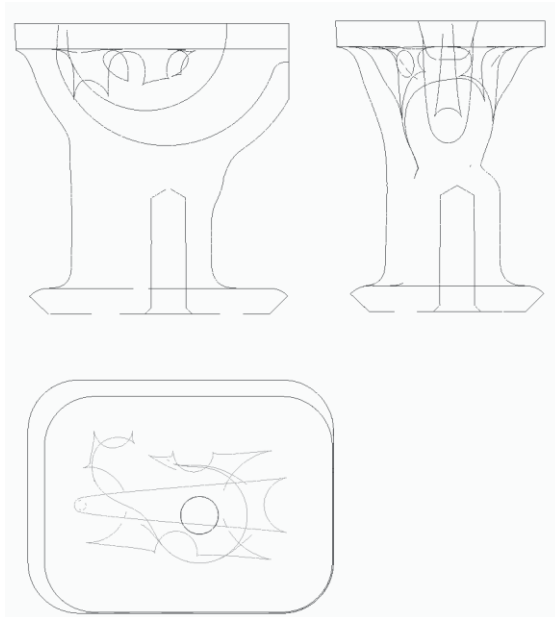


Figura 65: Conceito do modelo otimizado da peça com uma redução de massa de 65%.

De notar que na zona central localizada acima do arco da injeção, tal como referido anteriormente, é retirado bastante material pelo *software* de otimização topológica. À medida que se aumenta a percentagem objetivo de material removido (Figura 66) torna-se ainda mais claro a possibilidade de remover material dessa zona.

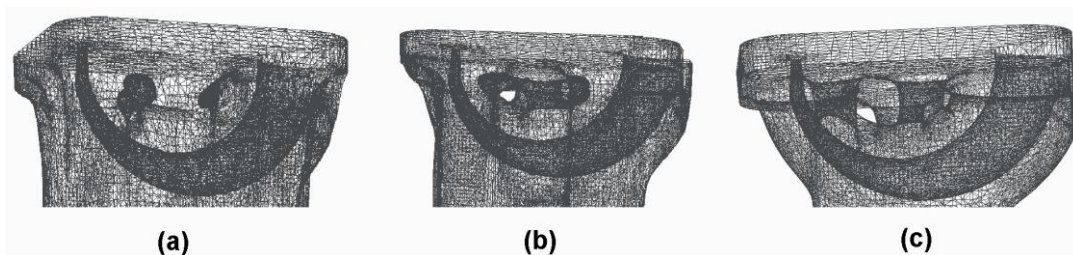


Figura 66: Vista pormenorizada da curva do canal de injeção do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 65% (c).

Com o aumento da percentagem objetivo de material a remover (Figura 67) torna-se também visível que o material mais perto da base e circundante da zona central da peça não é importante, pelo que é possível remover grande parte deste material. No entanto, como o inserto terá de ser ajustado numa caixa, não se poderão remover as faces exteriores deste.

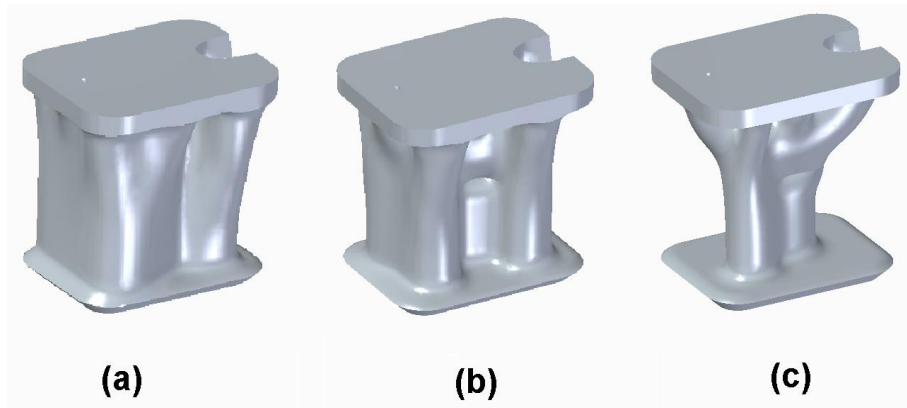


Figura 67: Vista isométrica do conceito do modelo otimizado com uma redução de massa em 35% (a), 50% (b) e 65% (c).

Alterando a geometria inicial do inserto, com o objetivo de remover volume de zonas não funcionais da peça, criou-se um modelo do sólido a subtrair ao componente (Figura 68). De notar que as zonas referidas anteriormente como não sendo importantes à resistência estrutural do componente se encontram ocas, tendo sido necessário adicionar furos para remoção do pó não processado destas zonas.

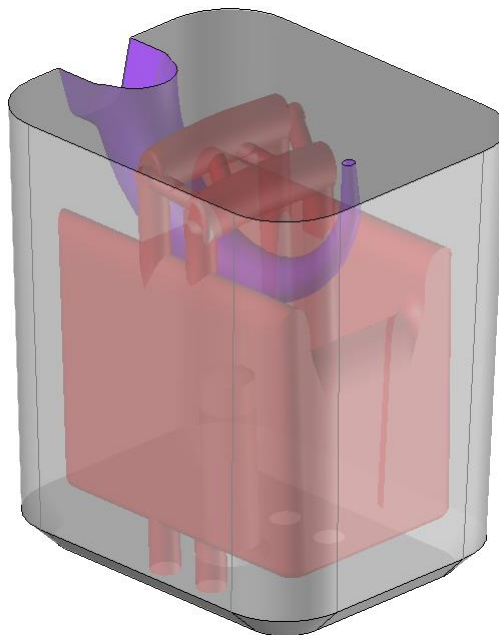


Figura 68: Material removido do componente assinalado a vermelho.

Alterando a secção das zonas vazias, eliminando a necessidade de suportes nessa zona, chegou-se ao componente topologicamente otimizado (Figura 69).

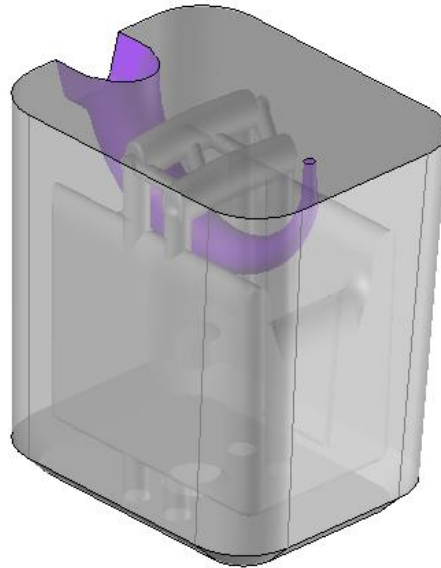


Figura 69: Modelo topologicamente otimizado do inserto de injeção.

Após obter o modelo topologicamente otimizado criou-se um modelo pensando no método de fabrico híbrido (Figura 70), onde a base deste componente será fabricada antes do processo de SLM. Esta base terá todas as furações efetuadas antes de ser colocada na máquina de SLM, não sendo assim necessário realizar as operações de furação após o processamento do restante componente.



Figura 70: Vistas laterais do modelo híbrido original (à esquerda) e modelo híbrido topologicamente otimizado (à direita).

Adaptando o componente com a base para produção híbrida obteve-se o Modelo Híbrido Topologicamente Otimizado (Figura 71), modelo final deste componente. O 2D do componente está apresentado no Anexo II.

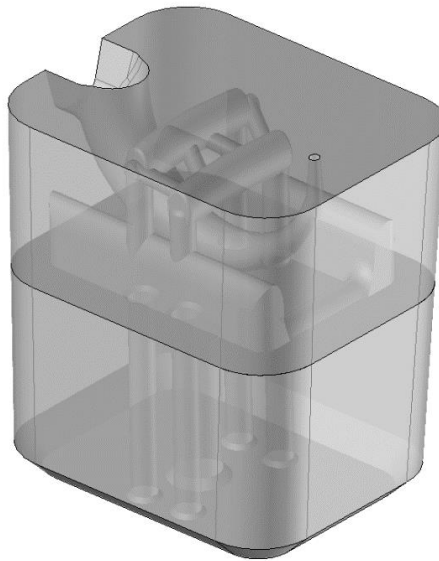


Figura 71: Vista isométrica do modelo híbrido topologicamente otimizado.

4.2.5. Montagem do componente

A montagem do inserto de injeção será semelhante à ilustrada na Figura 72. O inserto é alocado completamente ajustado numa caixa fresada na bucha e fixo por um parafuso que varia de M5 a M6 dependendo da dimensão do componente.

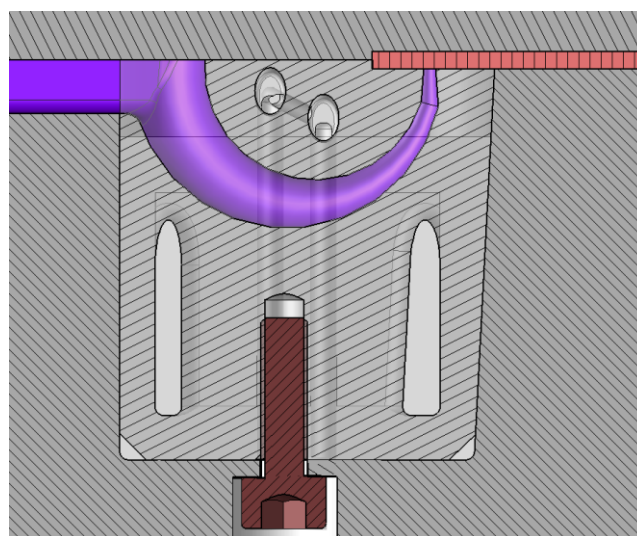


Figura 72: Exemplo de montagem do inserto de injeção MTO.

4.3. Produção dos componentes

De modo a processar a informação do CAD 3D para a máquina de SLM é necessário primeiro analisar a geometria da peça que se pretende construir por camadas e definir a posição que a peça terá na mesa. A geometria importada terá de ser em formato “.STL”, este formato baseia-se numa malha de triângulos que cobre a superfície do sólido. Este ficheiro será então importado para o programa nativo da máquina ProX® DMP300.

No caso do casquilho refrigerado a construção da peça foi definida tal como representado na Figura 73.

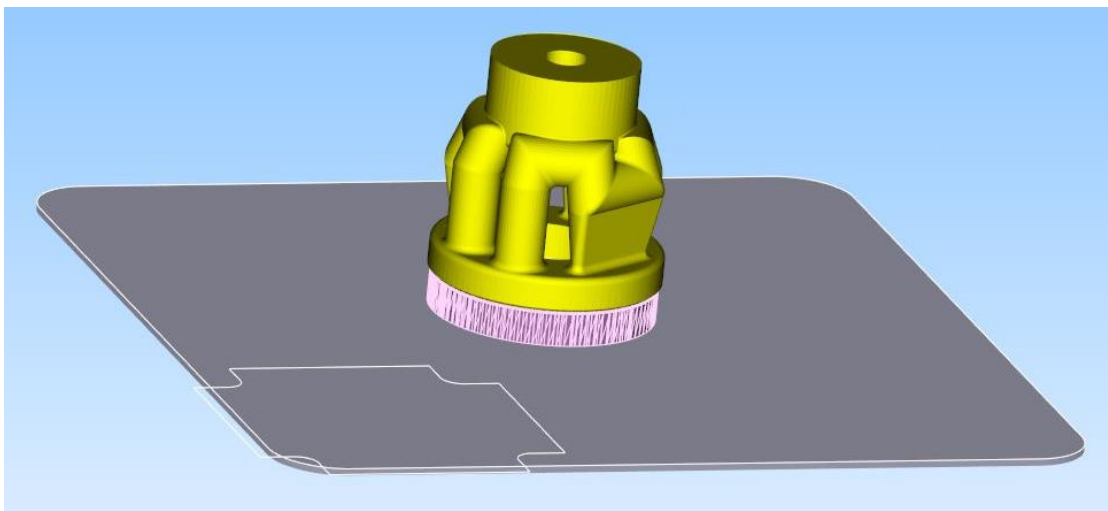


Figura 73: Disposição da peça e dos suportes no prato de construção.

Esta orientação da peça na plataforma de construção teve impacto nos ângulos das estruturas intermédias do componente, desta forma, face às decisões de projeto tomadas não foi necessário recorrer a suportes para as zonas processadas. Recorrendo ao método totalmente aditivo (Figura 74) apenas serão necessários suportes na base da peça a construir. Estes suportes serão posteriormente cortados de modo a separar a peça do prato de construção.

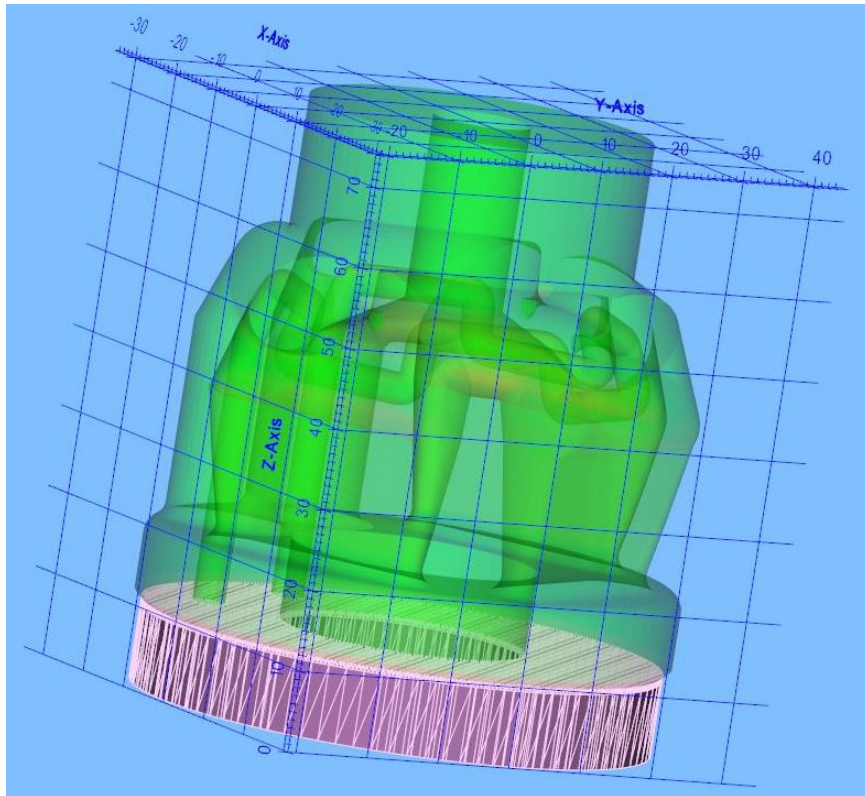


Figura 74: Representação do ST15/26 MTO para produção.

Tendo sido seguido o método híbrido para a produção do casquilho, este formado por 1.2709, foi processado sobre um bloco de 1.2343 com 58 HRC (temperado a cerca de 550 °C). Este bloco necessita de ser posicionado no prato de construção e após a deposição de pó sobre o bloco (Figura 75) é efetuada a verificação do programa, neste caso verifica-se se a construção da peça está de acordo com a posição dos furos pré-existentes do bloco.

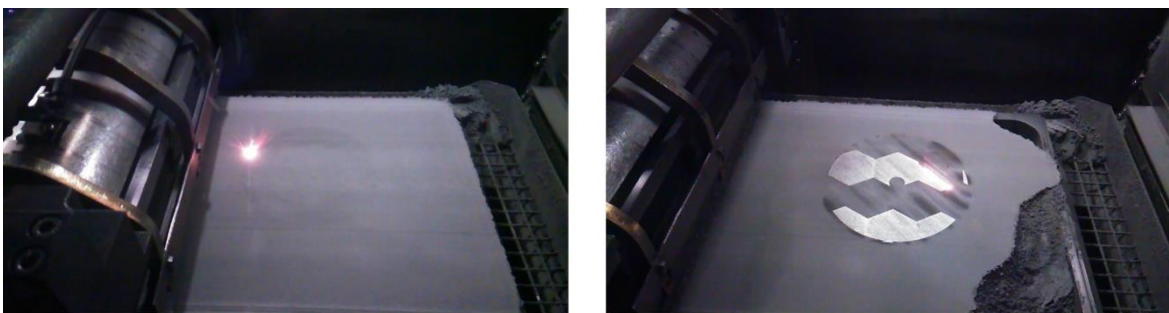


Figura 75: Início do processo SLM;

Após verificar se a peça está totalmente centrada e posicionado corretamente o programa é colocado em automático e o processo de construção continua sem interrupções (Figura 76). Geralmente são controladas as dez a vinte camadas iniciais de modo a garantir o bom funcionamento do processo.

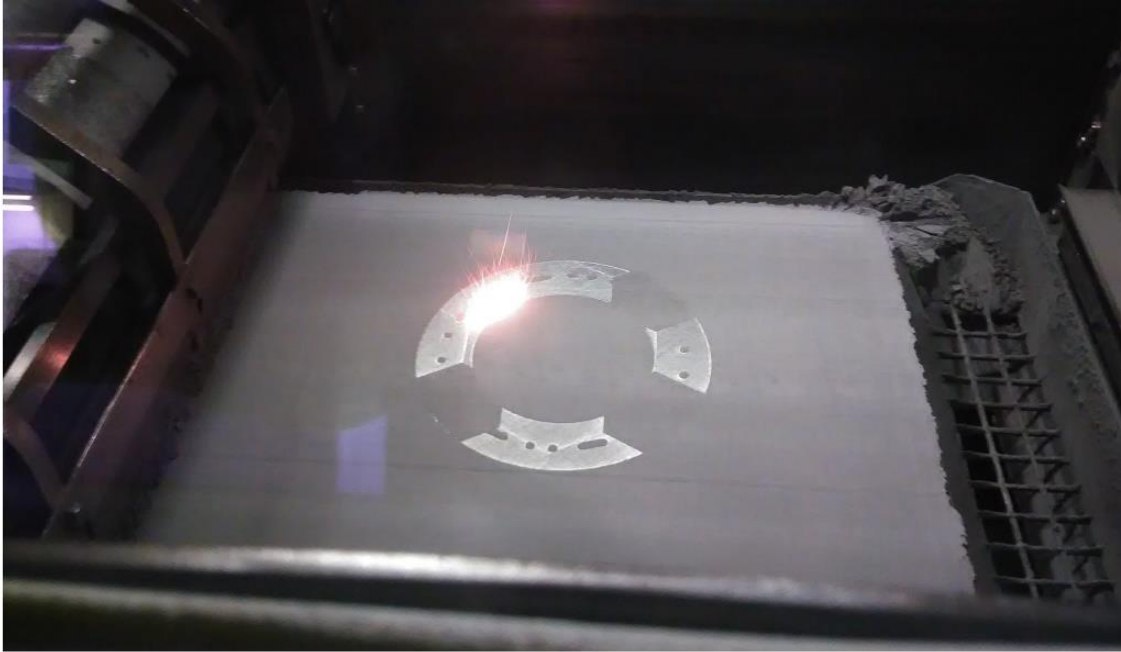


Figura 76: Processamento do casquilho refrigerado.

Após a finalização da peça e da remoção desta do prato de construção, é efetuada a remoção do pó de suporte que não foi processado no interior dos canais de refrigeração. Por motivos de sigilo não é possível apresentar a peça finalizada.

A remoção do pó dos canais de refrigeração é efetuada pelo processo de decapagem com jato abrasivo de microesferas de vidro (100-200 micrómetros de granulometria). Este último para além de limpar o interior dos canais consegue também fazer algum polimento nas peças, servindo também para retirar o restante pó da superfície das peças.

Devido à necessidade de dureza é levado o componente a um tratamento térmico de endurecimento por precipitação (a cerca de 500 °C), onde este não irá alterar as propriedades do aço da base. Este processo híbrido é muito vantajoso na produção de componentes que tenham como possibilidade a produção por métodos convencionais de grande parte da sua geometria base, tal como se verifica para ambos componentes deste projeto.

Posteriormente foi necessário fazer o acabamento de duas faces circulares do casquilho, onde estas irão ter ajustamento com os furos calibrados presentes na cavidade onde estes se inserem. Para tal recorreu-se ao processo de torneamento para fazer o perfil de ajustamento da zona de topo do casquilho, as restantes geometrias do casquilho são zonas de folga, pelo que não necessitam de acabamento.

Quanto ao inserto de injeção com canal do tipo “banana”, o seu processo de fabrico é semelhante ao do componente anterior, sendo também processado sobre um bloco de aço pré-existente. Neste caso foi necessário fazer o acabamento de todas as paredes de ajustamento recorrendo ao processo de retificação. Além disso o canal de injeção necessita de ser polido, para tal o processo de AFM (*Abrasive Flow Machining*), um método de abrasão que funciona com um fluxo de partículas, ideal para polir canais interiores (ExtrudeHone, 2019), poderá ser uma excelente opção para se obter uma superfície suficientemente polida para que o material termoplástico fundido não se adira à superfície do canal.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5. Discussão de resultados

5.1. Impacto no tempo de extração

Assim, de modo a validar o circuito de refrigeração dimensionado anteriormente e de modo a verificar se a sua conceção demonstra melhorias face à opção convencional realizaram-se vários estudos de enchimento de modo a validar a refrigeração.

O estudo de enchimento dividiu-se em três etapas, sendo elas:

- Enchimento (*Filling*);
- Compactação + Empeno (*Packing + Warpage*);
- Refrigeração (*Cooling*).

O molde em estudo (Figura 77) possui duas cavidades, sendo ambas alimentadas por um bico de injeção simples unitário que injeta num canal frio que irá injetar num ataque em leque.

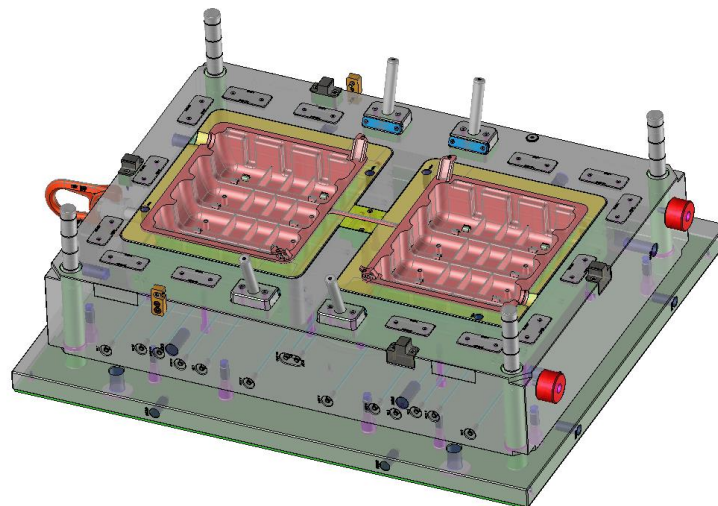


Figura 77: Vista isométrica do lado da injeção do molde em estudo.

Em situações onde a peça será extraída pelo jito através da ação de um mecanismo automático, tal como um *robot*, é necessário que o material do jito tenha atingido a temperatura de extração, deste modo o jito ao ser removido pelo mecanismo não será deformado em demasia, o que aconteceria se este ainda estivesse num estado demasiado quente, o que implicaria o insucesso na extração da peça.

Na Figura 78 pode-se observar o sistema de refrigeração utilizado para ambas peças e na zona central (definido a vermelho) o canal de fluxo do bico de injeção, sendo visíveis as linhas de refrigeração do casquilho desenvolvido à volta da zona de injeção.

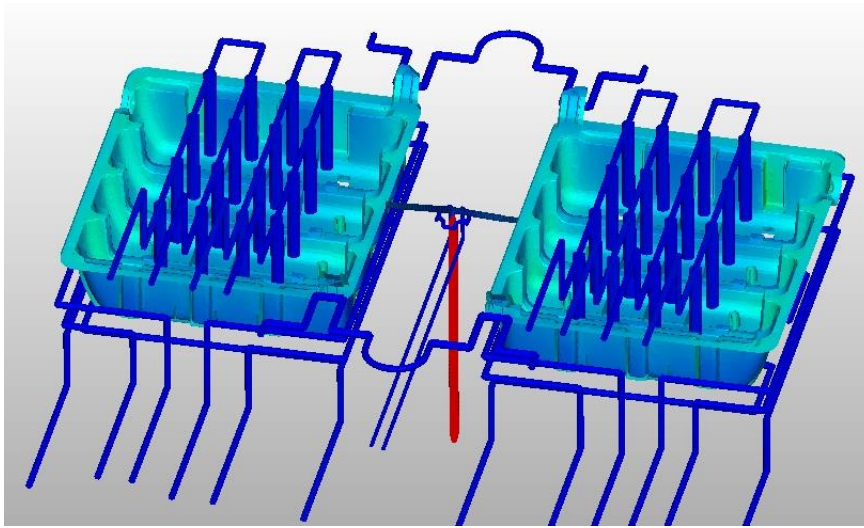


Figura 78: Linhas de refrigeração (a azul) e canal do bico de injeção (a vermelho).

Os dados relativos à peça a injetar e ao material do molde utilizados no estudo estão apresentados na Tabela 14. O material utilizado foi um PP utilizado em vários componentes da indústria automóvel (Anexo IV).

Tabela 14: Informação inicial para o estudo de enchimento.

Material injetado	PP Hifax CB 1158G
Volume da peça [mm ³]	1699505
Dimensão da peça [mm]	550x430x150
Espessura média da peça [mm]	3,5
Dimensão do jito [mm]	8x10x20°
Material das zonas moldantes	1.2738 40HRC

Como dados de entrada para a fase de enchimento e de compactação foram utilizados os valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros de injeção e de compactação.

Temperatura de injeção [°C]	245
Temperatura do molde [°C]	40
Tempo de injeção [s]	4
Tempo de compactação [s]	25
Pressão de compactação [bar]	400
Transição para compactação	99%

Quanto aos dados utilizados na simulação de refrigeração com os circuitos existentes no molde foram utilizados os dados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Parâmetros da refrigeração do molde.

Limite máximo de perda de pressão nos circuitos de refrigeração [bar]	2
Fluido refrigerante	Água
Temperatura de entrada dos circuitos [°C]	40
Diâmetro canal convencional [mm]	10
Diâmetro canal conformável [mm]	6

A análise feita a ambos estudos focou-se na análise aos tempos de *Sealing*, *Freezing* e *Ejection time*, relacionados diretamente com o tempo de ciclo da peça.

Estes podem ser definidos como:

- *Sealing time* entende-se como o intervalo de tempo que demora até a zona de ligação entre o jito (canal frio) e o bico de injeção (canal quente) solidificar, ou seja, o material injetado deixar de fluir;
- *Freezing time* é considerado o tempo em que a totalidade de uma secção da peça atingiu a temperatura de não-fluxo, ou seja, tal como referido anteriormente, o material injetado deixar de fluir;
- *Ejection time* ou tempo de extração deve ser entendido como o tempo que demora ao material injetado atingir a temperatura de extração. Esta temperatura depende do tipo de material, variando consoante o fabricante do material, esta baseia-se nos valores

da temperatura de deflexão térmica do material (HDT) ou da temperatura de amolecimento (VICAT).

Foi realizado um estudo de enchimento sem refrigeração, ou seja, o *software* considerou uma refrigeração perfeita, sendo que os valores obtidos são considerados como ideais teoricamente, isto é, não é considerado nenhum diferencial de temperatura no aço das cavidades, assim sendo, o molde mantém-se sempre a uma temperatura constante. Estes valores teóricos ideais calculados apresentaram os seguintes resultados:

- *Sealing time*: 54 s;
- *Freezing time*: 82 s;
- *Ejection time*: 112 s.

Comparando os valores obtidos nos estudos com circuitos de refrigeração convencionais e os conformáveis com os valores ideais teóricos é possível calcular a eficiência de refrigeração destes.

Compararam-se então os estudos de enchimento (Tabela 17). É de notar que os valores retirados dizem respeito apenas ao jito, não foram retirados valores referentes à restante peça plástica, visto o circuito que difere em ambos estudos (circuito de refrigeração do bico) não tem impacto sobre a restante peça, tendo impacto apenas sobre a zona do bico de injeção (jito).

Tabela 17: Valores obtidos de *sealing time*, *freezing time* e *ejection time* dos três estudos realizados.

Simulação de Enchimento	Tempos		
	<i>Sealing time</i> [s]	<i>Freezing time</i> [s]	<i>Ejection time</i> [s]
C/ refrigeração convencional	57	96	140
C /refrigeração conformável	56	93	134

Na Figura 79 é possível verificar que aos 136 segundos o jito da peça ainda não atingiu a temperatura de extração (zona pintada com traços azuis em fundo branco), estando ainda num estado fluido.

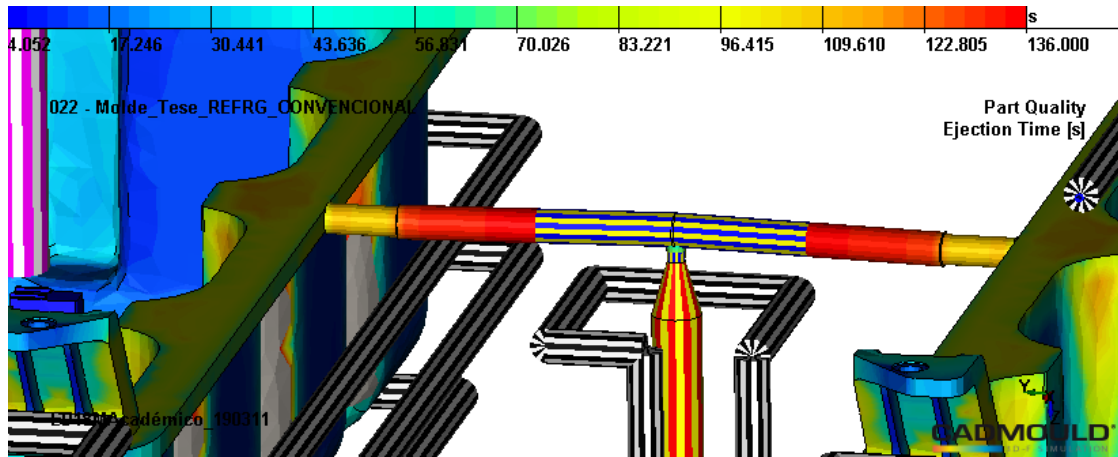


Figura 79: Resultado de tempo de extração obtido para solução de refrigeração convencional.

Recorrendo ao circuito de canais conformáveis é possível reduzir o tempo de extração do jito para os 136 segundos (Figura 80), não estando o material deste num estado fluido.

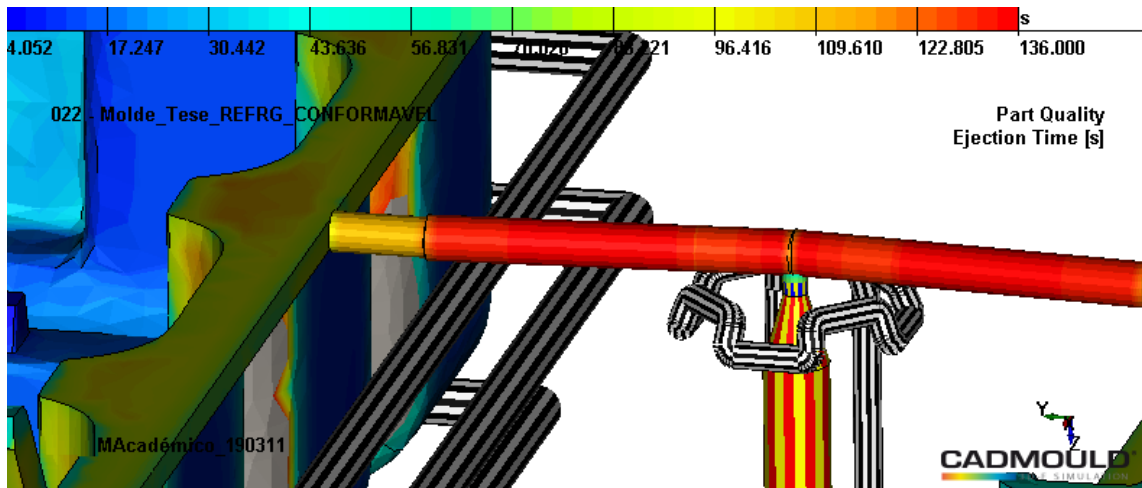


Figura 80: Resultado de tempo de extração obtido para solução de refrigeração com canais conformáveis.

Após a análise é facilmente identificável que o valor otimizado será o da opção com refrigeração conformável, com um tempo de extração cerca de 4% mais eficiente quando comparado com a refrigeração convencional (Tabela 18). De notar que os valores de eficiência estando estes a ser comparados com uma refrigeração ideal serão sempre com sinal negativo.

Tabela 18: Valores obtidos de eficiência para os dois estudos com refrigeração.

Estudo de Enchimento	Eficiência		
	<i>Sealing time</i>	<i>Freezing time</i>	<i>Ejection time</i>
C/ refrigeração convencional	-6%	-17 %	-24 %
C/ refrigeração conformável	-5%	-14 %	-20 %

Para além dos resultados obtidos quanto ao tempo de extração foram também obtidos os valores referidos na Tabela 19, tal como o de fluxo de calor (Figura 81).

Tabela 19: Resultados de refrigeração obtidos no estudo.

Refrigeração	Convencional	Conformável
Nº de Reynolds	98808	47688
Caudal do Circuito [l/min]	28,1	8,1
Fluxo de Calor [W/m ²]	12081	15362
Ganho de Temperatura [°C]	0,2	0,4

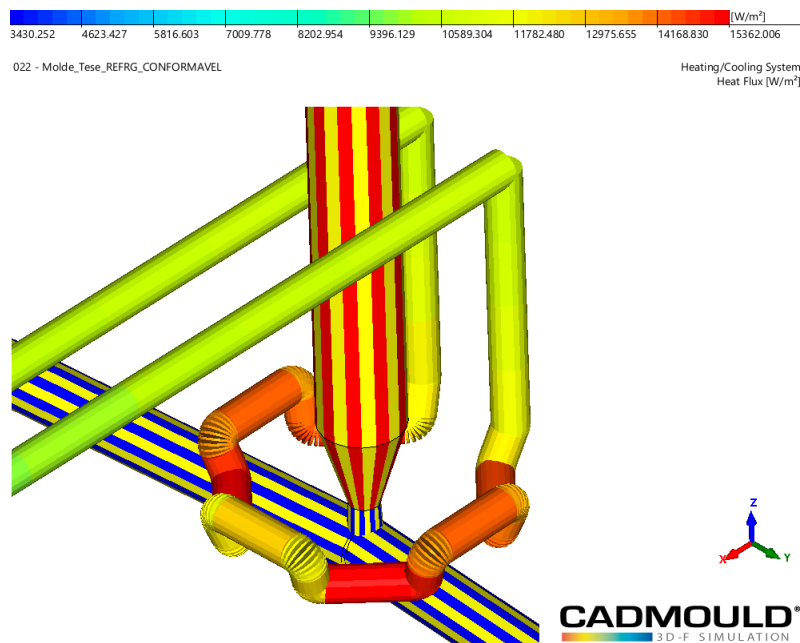


Figura 81: Resultado obtido do fluxo de calor para o circuito conformável.

Finalmente pode-se concluir que com a utilização do circuito com refrigeração conformável, cujo diâmetro do canal é de apenas 6 mm, obtém-se uma redução no tempo de extração do jito em cerca de 5 segundos quando comparado com a refrigeração convencional cujo diâmetro do canal é de 10 mm. Tal deve-se à grande proximidade e muito maior

homogeneidade da refrigeração do circuito de refrigeração face ao jito, o que não é possível recorrendo ao método convencional.

O número de Reynolds no circuito convencional mostrou-se superior ao conformável, tendo sido obtido cerca do dobro do valor, ainda assim ambos circuitos situam-se no regime turbulento. O caudal necessário ao circuito conformável é relativamente menor quando comparado com a refrigeração convencional.

Quanto ao fluxo de calor, obteve-se um resultado muito satisfatório em ambas refrigerações, no entanto o fluxo de calor é maior na refrigeração conformável, tal representa uma maior remoção de calor, o que justifica a redução do tempo de ciclo observada anteriormente.

De acordo com o manual do projetista (Granja *et al.*, 2006) um circuito de refrigeração deverá ter um ganho máximo de temperatura entre a entrada e a saída do circuito de cerca de 5 °C, sendo que na prática um circuito que apresente uma diferença superior a 2 °C poderá estar a aquecer o molde invés de o arrefecer, o que não é satisfatório. Portanto o valor obtido para ambos circuitos é excelente, sendo que o maior ganho de temperatura obtido foi de cerca de 0.4 °C, o que é ideal e significa que ambos circuitos foram bem dimensionados.

Avaliando cada um dos parâmetros resultantes do estudo de temperatura de 1 a 5, sendo o “5” um excelente desempenho e o “1” o desempenho menos satisfatório, pode-se avaliar cada um dos métodos de refrigeração utilizados na simulação e comparar graficamente (Figura 82) o desempenho destes relativamente aos parâmetros seleccionados.

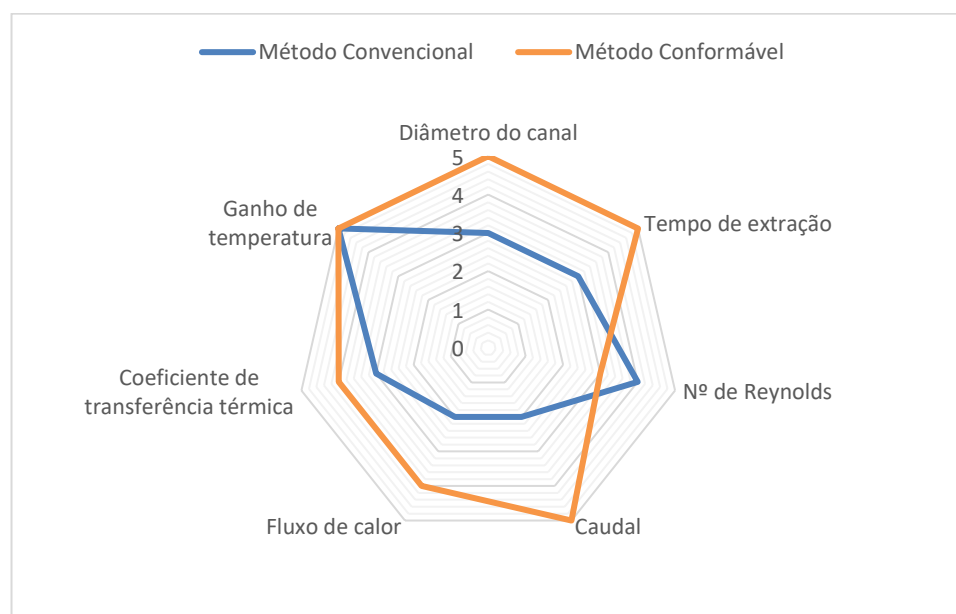


Figura 82: Desempenho do método convencional vs. método conformável.

Considerando o fluxograma (Figura 25) apresentado inicialmente no capítulo 4, é possível adaptá-lo especificamente a este componente. A necessidade de utilização de um componente de refrigeração com as características do desenvolvido pode ser representada esquematicamente pelo fluxograma da Figura 83, sendo a diferença essencial a realização de uma simulação de enchimento focada numa simulação de refrigeração da peça.

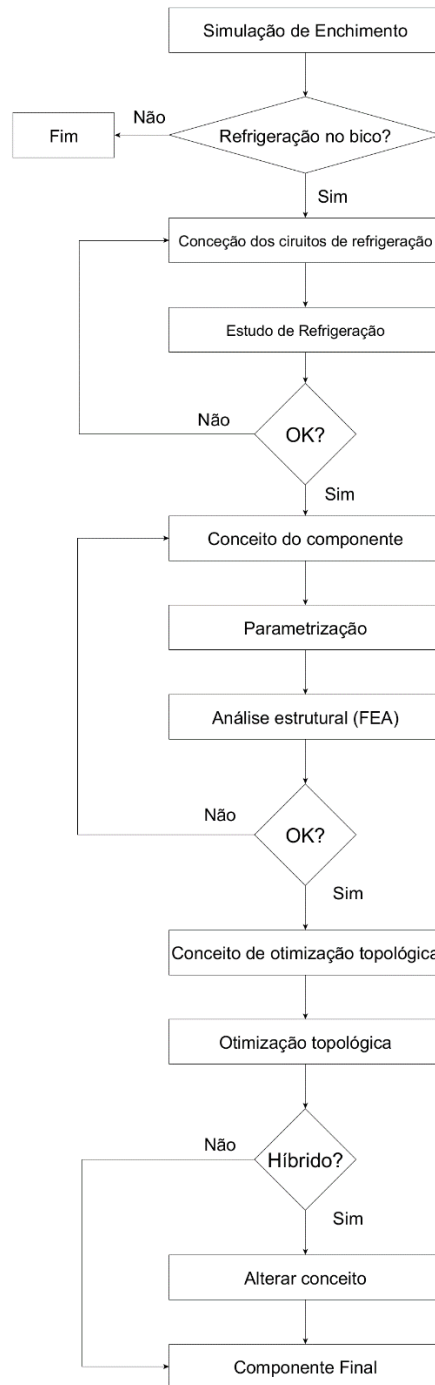


Figura 83: Fluxograma para identificação da necessidade do casquilho desenvolvido.

5.2. Análise de tempos e custos de fabrico

Ao contrário do fabrico convencional, o custo maioritário de uma peça produzida por fabrico aditivo não é determinado maioritariamente pela complexidade da mesma, o que iria ditar quais as tecnologias de fabrico a utilizar e o tempo que iria ser necessário à peça ser processada por todas essas tecnologias, mas sim pelo volume de material utilizado.

Realizando inicialmente uma análise dos tempos de produção foi possível chegar a valores genéricos para o processo de SLM (Tabela 20). Foi determinado um valor temporal médio em minutos para as diversas operações a efetuar no *setup* da máquina, processamento e finalmente na troca de peça da plataforma de construção. Algumas das operações não foram consideradas pois não são frequentes, tais como a troca de material que pode demorar até 2 dias, a substituição do filtro de fumos, que é efetuada a cada 1500 horas de funcionamento aproximadamente e o tempo de aquecimento da câmara de trabalho, pois este não é necessário para o material que se está a trabalhar (1.2709). Quanto ao tempo de distribuição do pó ele é constante, pelo contrário, o tempo de funcionamento do laser depende de peça para peça.

Tabela 20: Tempos médios registados para *setup* da máquina, processamento e troca de peça.

		Tempo [min]
Tempo de <i>setup</i> da máquina	Montagem da plataforma de construção	15
	Setup da atmosfera controlada de gás inerte	30
	Aquecimento da câmara de trabalho	NA
	Preparação do ficheiro CAD	30
	Troca de material	NA
	Limpeza da câmara de processamento	10
	Substituição dos filtros de fumo	NA
	Setup da primeira camada de pó	25
Processamento	Distribuição do pó	0,15
	Tempo de funcionamento do laser	NA
Tempo de troca de peça	Arrefecimento da peça e plataforma de construção	30
	Reciclagem do pó não processado	180
	Remoção do pó não processado	3
	Remoção da plataforma e da(s) peça(s)	30
	Remoção do pó de canais ou zonas ocas interiores	15

De modo a obter um valor para o custo de fabrico para os diferentes componentes referidos neste projeto foi necessário calcular alguns parâmetros, sendo eles:

- Custo/hora de fabricação;
- Custo de matéria-prima por peça;
- Tempo de fabrico.

5.2.1. Modelo de custo – Custos de máquina

Para o cálculo do custo/hora de fabricação foram considerados algumas condições iniciais de modo a obter um valor justo e foram levantados alguns valores médios relativamente ao tempo médio de operações tal como referido na Tabela 20. Foram consultados os métodos de Barclift (Barclift *et al.*, 2016) e Baumers (Baumers *et al.*, 2012), (Baumers *et al.*, 2014) e adaptados ao contexto da produção dos componentes normalizados deste projeto.

Os custos energéticos do processo de SLM dividem-se em 5 grupos:

- Custos elétricos do processamento;
- Custos com ar comprimido;
- Custos de compressão de gás (nitrogénio ou argon);
- Custos com o aspirador a vácuo;
- Custos com ventilação do local de trabalho.

Enquanto os custos de material podem ser separados em dois grupos:

- Custos de matéria-prima;
- Custos com gás inerte (nitrogénio ou argon).

Sendo o argon utilizado apenas quando o pó processado é considerado reativo (ex.: titânio), o nitrogénio é utilizado para todos os pós não reativos.

Custos de pós-processamento:

- Remoção da peça do prato de fabrico (caso seja necessário);
- Remoção das estruturas de suporte (caso não sejam incluídas no *design* da peça);
- Acabamento da superfície da peça caso seja necessário (polimento, textura química, maquinação, etc.);
- Tratamento térmico.

Deste modo os valores considerados apresentados na Tabela 21 foram equacionados a partir de valores de mercado, onde o custo de manutenção e reparação foram estimados tendo por base a realidade da empresa Socem Inpact.

Tabela 21: Custos fixos da máquina de SLM.

Custos fixos	
Custo aquisição máquina [€]	650000
Custos de acessórios [€]	4000
Custo <i>software</i> [€]	NA
Manutenção [€/ano]	19000
Reparação [€/ano]	5000

De modo a calcular o custo total da máquina (CTM) adquirida recorreu-se à seguinte equação:

$$CTM = CA + CS$$

Onde,

- CA: Custo de Aquisição;
- CS: Custo de *software*.

Recorreu-se à equação para determinar o custo de depreciação anual. Foi considerada uma vida útil de 8 anos (Baumers, et al., 2012):

$$\text{Custo de depreciação anual} = \frac{(CA + VR)}{\text{Vida útil}}$$

Onde,

- VR: Valor Residual.

Considerou-se de modo a obter valores realistas para o custo de utilização da máquina de SLM que foi feito um investimento inicial com uma taxa de juros anuais de 10% com uma duração de 60 meses (5 anos).

$$\text{Custo total de juros} = TJ \cdot \Delta J \cdot CTM$$

Onde,

- TJ: Taxa de juros anuais;
- ΔJ : Duração dos juros.

Considerou-se ainda um custo anual das instalações fixo, considerou-se um dos pacotes de manutenção *standard* oferecidos pela empresa fornecedora de equipamento, fez-se uma estimativa dos custos anuais de reparação da máquina e considerou-se um valor de mercado para as despesas com o operador (salário, seguro de trabalho, etc.).

De modo a calcular um valor para os custos energéticos associados ao tempo de processo da máquina foi utilizado um diagrama de blocos, onde se estimou as diferentes utilizações em percentagem da potência máxima do laser e da máquina. Deste modo obteve-se um valor médio genérico para a utilização deste tipo de processo. Foi considerado então, tal como representado no gráfico da Figura 84, uma utilização de 20% da potência máxima do laser em 20% do tempo de funcionamento da máquina e 40% da potência máxima do laser em 80% do tempo de funcionamento.

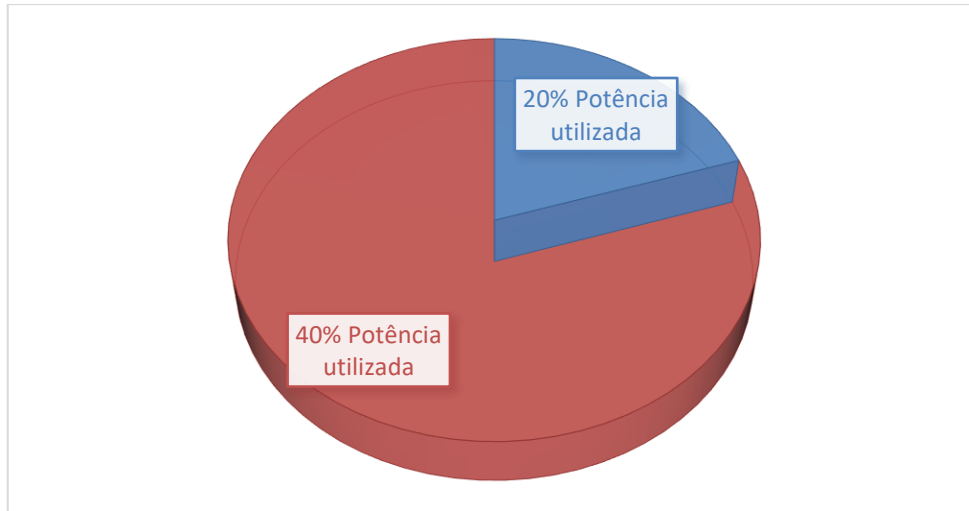


Figura 84: Utilização da potência do laser ao longo do processamento.

Para calcular os custos produtivos deste processo recorreu-se à seguinte equação:

$$\text{Custos produtivos} = (CD + CJ + CMan + CR + CE + CPessoal + CInstal) \cdot TF$$

Onde,

- CD: Custo de depreciação anual;
- CJ: Custo de juros;
- CMan: Custo de Manutenção;
- CR: Custo de reparação;
- CE: Custos energéticos;
- CPessoal: Custos com pessoal;
- CInstal: Custos com instalações;
- TF: Tempo de fabrico.

De modo a calcular os custos produtivos estimou-se um valor de utilização da máquina face a dados reais. Deste modo obteve-se um valor de custos produtivos (não considerando tempos de *setup*) e de custos não-produtivos (não utilização da máquina e considerando tempos de *setup*), não tendo estes em consideração os gastos energéticos durante a não utilização da máquina devido a estes serem desprezáveis quando comparados com os gastos durante produção.

Deste modo obteve-se o custo de produção geral que engloba os custos produtivos e custos não produtivos:

$$\text{Custos de produção} = \text{Custos produtivos} + \text{Custos não produtivos}$$

Facilmente se reparou que a maior parte do custo de produção se prende aos custos fixos, representado no gráfico da Figura 85, sendo que os custos energéticos são muito pouco significativos face aos restantes.

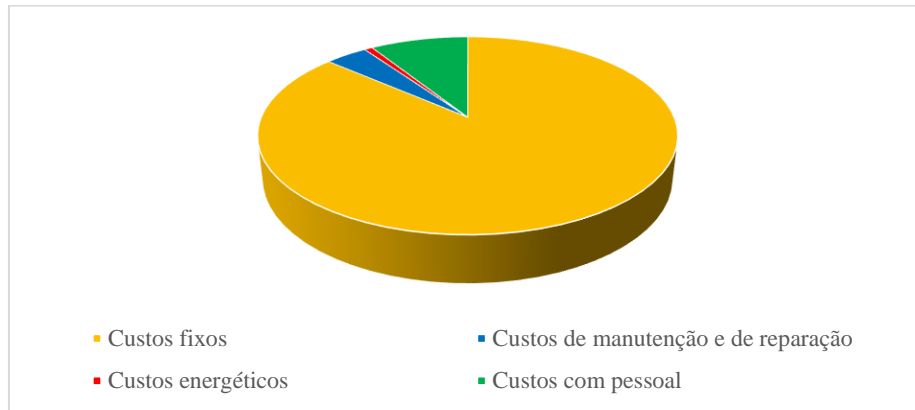


Figura 85: Custos anuais fixos, energéticos, manutenção/reparação e com pessoal.

A estes custos acrescem ainda os custos de possíveis futuras operações, tais como corte por eletroerosão por fio, tratamentos térmicos e retificação. Os valores destes custos foram retirados da realidade das empresas do Grupo Socem.

5.2.2. Modelo de custo – Custos por peça

Tendo os custos de produção gerais calculados segue-se o cálculo dos custos unitários. Para tal recorreu-se a um método utilizado para o cálculo do custo de peças produzidas pelo processo de SLM (Gibson, Rosen e Stucker, 2010). Considerando a seguinte fórmula é possível calcular o tempo de fabrico:

$$\text{Tempo de setup} + \text{Tempo de processo} = \text{Tempo de fabrico}$$

Desta forma será necessário calcular dois tempos, o de *setup* e o de processo. Tendo sido o tempo de *setup* calculado de uma forma genérica, tendo por base os dados recolhidos na Tabela 28, o tempo de processo pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\text{Tempo de processo} = \frac{\text{Volume de construção}}{\text{Taxa de construção}}$$

Ambos parâmetros do tempo de processo são calculados pelas seguintes fórmulas:

$$\text{Volume de construção} = \text{Volume da peça} + \text{Volume dos suportes}$$

$$\text{Taxa de construção} = \Delta c \cdot \Delta ls \cdot vscan$$

Onde,

- Δc : espessura da camada;
- Δls : espaçamento *scan line*;
- $Vscan$: velocidade do *scan*.

Além disso, o tempo auxiliar, considerado como sendo o tempo de distribuição do pó, pode ser calculado da seguinte forma:

$$taux = nc \cdot tap$$

Onde,

- $Nc = n^\circ$ de camadas;
- Tap : tempo de aplicação da camada de pó.

Considerando que,

$$Nc = \frac{\text{Altura da peça}}{\Delta c}$$

Temos que,

$$taux = \frac{\text{Altura da peça}}{\Delta c} \cdot tap$$

O tempo de aplicação do pó pode ser calculado através da distância percorrida pelo rolo nivelador e da velocidade do mesmo ao depositar a camada de pó:

$$tap = \frac{Lplataforma + Ladicional}{Vap}$$

Onde,

- *Lplataforma*: Dimensão do eixo y do prato de construção;
- *Ladicional*: Distância entre o rolo nivelador e o prato de construção;
- *Vap*: Velocidade de avanço do rolo nivelador.

Assim sendo, o valor do custo unitário pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$Custo\ unitário = \frac{PM \cdot TF + CM \cdot VolTotal}{N}$$

Onde,

- *PM*: Custo de produção;
- *TF*: Tempo de fabricação (tempo de *setup* + tempo de processo);
- *CM*: Custo da matéria-prima;
- *VolTotal*: Volume total processado (peça(s) + suportes);
- *N*: Número de peças processadas por programa.

5.2.3. Cálculo dos custos

Para ambos componentes foram retirados valores de volume processado, volume de suportes necessários e tempos de fabrico, de modo a criar relações entre os diferentes tipos de modelos desenvolvidos. Estes foram separados em Modelo Original (MO), Modelo Topologicamente Otimizado (MTO), Modelo Híbrido Original (MHO) e Modelo Híbrido Topologicamente Otimizado (MHTO). As várias simulações de processamento estão apresentadas nos Anexos V ao XII.

É possível identificar na Tabela 22 os valores quantificados de volume processado para cada modelo e a redução volumétrica obtida em cada um dos modelos desenvolvidos face ao MO. Visivelmente é notória a redução do MO para o MHTO em termos de volume processado, atingindo para o C ST15/26 uma redução de cerca de 70% do volume inicial do MO,

enquanto para o IB ST23/25 obteve-se uma redução ligeiramente inferior ao do componente anterior, ainda assim com 60% de redução volumétrica face ao MO.

Tabela 22: Volume processado e redução volumétrica dos diferentes modelos desenvolvidos para ambos componentes.

Componente	Volume Processado [mm ³]	Redução volumétrica [%]
C ST15/26 MO	156424	NA
C ST15/26 MTO	102086	35
C ST15/26 MHO	70684	55
C ST15/26 MHTO	51344	67
IB ST23/25 MO	55046	NA
IB ST23/25 MTO	45112	18
IB ST23/25 MHO	24490	56
IB ST23/25 MHTO	21781	60

Quanto ao tempo de fabrico (Tabela 23), foi analisado o tempo de processamento dos suportes, este foi tido como cerca de 2-5% do tempo de fabrico total do componente, ainda assim, nos modelos híbridos foi possível retirar completamente os suportes necessários, pelo que o tempo de fabrico foi então também reduzido devido a esse fator.

Tabela 23: Valores obtidos para os tempos de fabrico dos diferentes modelos desenvolvidos para ambos componentes.

Componente	Processamento de suportes [H]	Processamento da peça [H]	Processamento total [H]	Deposição de pó [H]	Nº. De camadas	Tempo Total de Fabrico [H]
C ST15/26 MO	1,2	15,5	16,7	9,8	1850	26,4
C ST15/26 MTO	1,1	10,1	11,2	9,8	1850	21,0
C ST15/26 MHO	NA	7,2	7,2	4,5	850	11,7
C ST15/26 MHTO	NA	5,3	5,3	4,5	850	9,8
IB ST23/25 MO	0,3	5,5	5,8	7,3	1375	13,1
IB ST23/25 MTO	0,3	4,6	5,0	7,3	1375	12,2
IB ST23/25 MHO	NA	2,5	2,5	2,6	500	5,2
IB ST23/25 MHTO	NA	2,3	2,3	2,6	500	4,9

O método de fabrico híbrido permitiu claramente reduzir o número de camadas necessárias a processar, pelo que juntamente com a redução de volume a processar ao recorrer à otimização topológica foi possível reduzir o tempo de fabrico desde o MO até ao MHTO para ambos componentes em cerca de 60%, tal como ilustrado no gráfico da Figura 86.

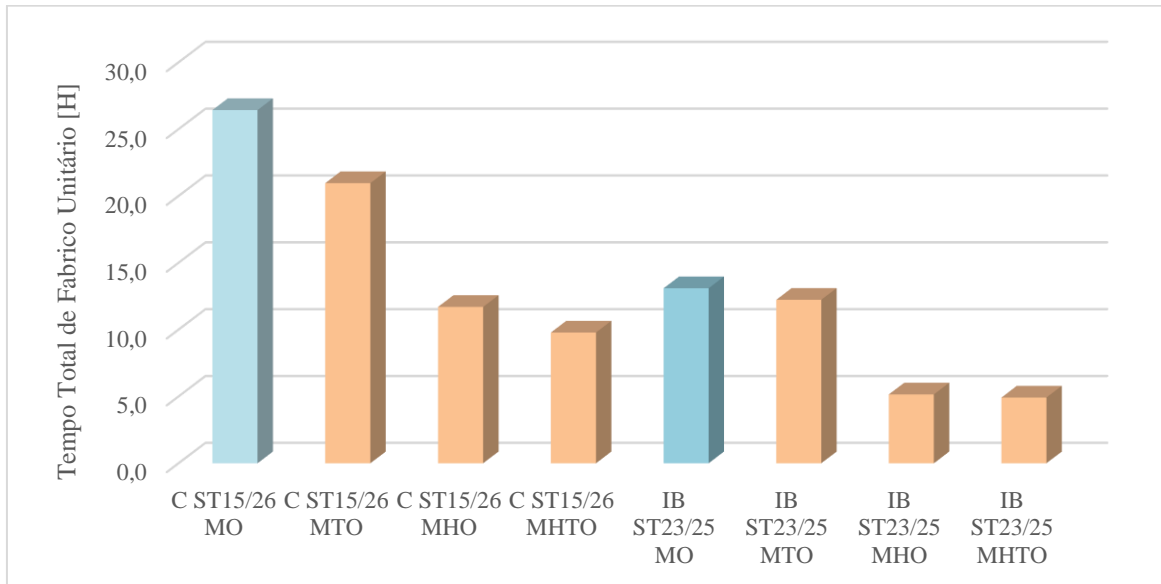


Figura 86: Tempo total de fabrico unitário dos vários modelos desenvolvidos para ambos componentes.

De modo a calcular o custo total do fabrico dos modelos desenvolvidos para ambos componentes foi necessário recorrer ao modelo de custos apresentado anteriormente, desta forma foi possível calcular os custos da matéria-prima e custos de máquina e então calcular os custos totais de produção.

Analisando os resultados do cálculo dos custos de produção dos componentes desenvolvidos é possível verificar no gráfico da Figura 87 que os custos relacionados com a matéria-prima não se aproximam sequer de 10% do custo total de fabrico. É possível verificar ainda que os valores de aquisição para componentes genéricos equivalentes no mercado atual são consideravelmente superiores face aos custos de produção obtidos neste projeto.

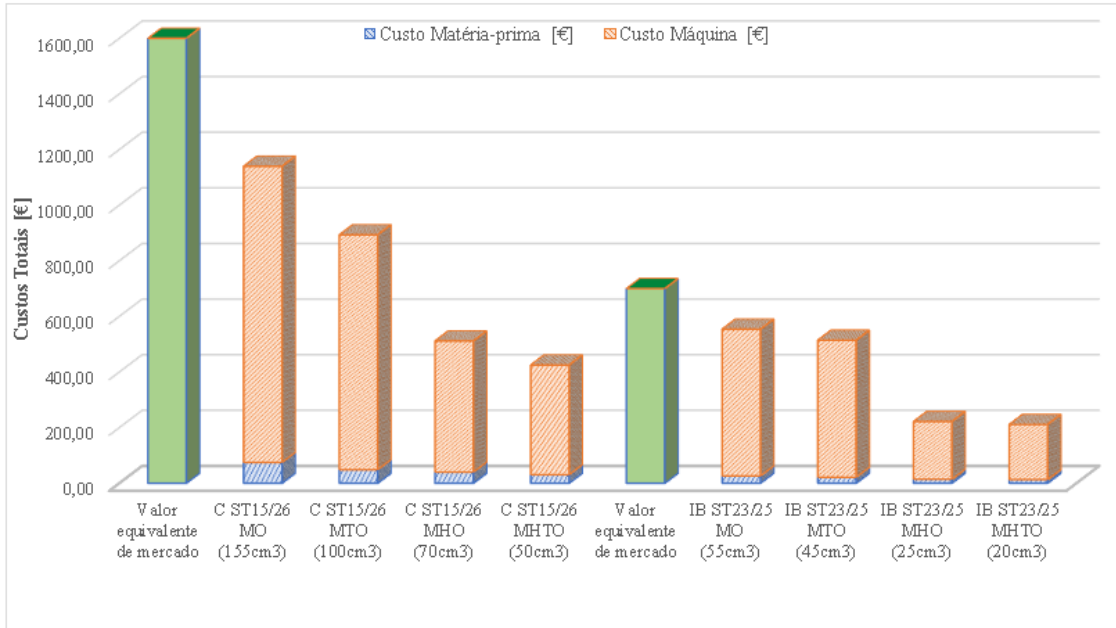


Figura 87: Custos totais de fabrico (custo de matéria-prima + custo de máquina) para cada modelo desenvolvido de cada componente e valores de aquisição para componentes equivalentes existentes no mercado.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

6. Conclusão

O desenvolvimento de componentes por fabrico aditivo metálico demonstra possuir um enorme leque de possibilidades em termos de produção industrial. Ao unir-se a métodos de *design* fora do convencional, a pensar no “aditivo”, revela uma substancial redução de custos e tempos de produção, tal implica de forma bastante clara uma resposta mais rápida em termos de *time-to-delivery*.

Não sendo neste caso concreto a redução da massa da peça importante a nível de desempenho, a otimização topológica neste caso traduz-se apenas na redução de custos de fabrico, sendo que tal como visto anteriormente a principal implicação no custo de produção não se trata da redução de volume de matéria-prima, mas sim na redução de tempo de processamento que esta visa, estando ambas relacionadas. Por outro lado, a possibilidade de recorrer a uma metodologia de fabrico híbrida reduz drasticamente os custos de produção por reduzir substancialmente os custos de processamento ao cortar o tempo de processamento para mais de metade nos casos de estudo. Obviamente a junção de ambos métodos de trabalho otimiza drasticamente os custos de produção dos componentes normalizados em estudo, viabilizando este método de produção.

Relativamente ao componente “casquilho refrigerado” este obteve resultados muito satisfatórios ao reduzir o tempo necessário até à extração do jito da peça na simulação de enchimento efetuada para o molde exemplo. Esta redução foi cerca de 5% do tempo necessário até à extração, tendo retirado neste caso 5 segundos de tempo de ciclo à peça.

Geralmente na indústria automóvel os moldes de injeção terão como vida útil cerca de 1 milhão de injeções, generalizando este valor para o caso de estudo pode-se retirar uma redução de cerca de 1400 horas de produção. Face a esta redução de tempo de ciclo, utilizando um custo genérico de mercado, tal poderá significar uma poupança de cerca de 150 mil euros na produção desta peça plástica ao longo da vida útil do molde de injeção.

Quanto aos componentes desenvolvidos, ambos apresentam vantagens em termos de montagem, sendo este também um motivo de valor acrescentado. O “casquilho refrigerado” ocupa muito menor espaço relativamente às soluções atuais disponíveis no mercado e o seu formato torna mais acessível a sua montagem como também a sua manutenção.

Relativamente ao “inserto de injeção”, a grande vantagem deste componente é possuir apenas uma peça na sua montagem, ao contrário das soluções existentes atualmente que são compostas por duas peças, o que causa alguma dificuldade em fazer a afinação do componente quer na produção quer na montagem, o que se traduz em custos de produção e de montagem.

Revela-se assim a importância uma otimização topológica e da utilização de uma metodologia de produção híbrida no desenvolvimento de componentes por fabrico aditivo metálico, quer em termos de utilização dos componentes quer em termos económicos, nomeadamente na redução de custo e tempo de produção (Figura 88).



Figura 88: Vantagens da utilização de otimização topológica combinada com a metodologia híbrida no fabrico aditivo.

Finalizando, o fabrico aditivo considerava-se apenas economicamente viável se este conseguisse acrescentar valor à peça, nomeadamente na redução de tempos de ciclo em moldes de injeção de termoplásticos ao recorrer a circuitos de refrigeração com canais conformáveis para este efeito. Veio-se provar assim que não apenas acrescenta valor aos componentes produzidos por este método como também é possível reduzir os custos de aquisição/produção deste tipo de componentes face às soluções existentes no mercado.

Desenvolvimentos futuros

Face às conclusões obtidas neste projeto, tendo em conta a realidade industrial para a qual estes componentes foram desenvolvidos e pensando também na necessidade de tornar a chamada “Indústria 4.0” uma realidade, sugere-se o seguinte para um projeto futuro:

- Estudo do comportamento de materiais recentes no mercado e que dispõem de pouca investigação tal como o *AMPO M798* da Bohler® que combina propriedades mecânicas semelhantes a aços como o 1.2709 com a resistência à corrosão de aços inoxidáveis;
- Análise prática do comportamento dos componentes desenvolvidos a nível de tempos de ciclo obtidos;
- Análise prática da montagem destes componentes no molde e possíveis afinações ao *design* desenvolvido;
- Desenvolvimento de um processo de produção automatizado para colocação e remoção dos pratos de construção da máquina, remoção das peças do prato de construção, remoção do pó não processado do interior das peças, tratamento térmico, acabamento e polimento das peças produzidas, controlo de qualidade, arrumação para *stock* e expedição para o cliente final.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Referências bibliográficas

3D SYSTEMS - **Metal Materials**, atual. 2019. [Consult. 15 ago. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.3dsystems.com/materials/metal>>.

3DSYSTEMS - ProX® DMP 300 - User Guide rev.B, 2017.

ADDISPACE - Diagnosis and study of opportunities of metallic additive manufacturing on SUDOE aerospace sector, 2017.

AS, B. VAN *et al.* - Direct Metal Laser Sintering Using Conformal Cooling for High Volume Production Tooling. **The South African Journal of Industrial Engineering**. (2017).

ATTAR, Elham - **Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes**. Erlangen : Universitat Erlangen, 2011

BARCLIFT, Michael *et al.* - Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. **Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference**. (2016).

BAUMERS, M. *et al.* - Combined Build-Time, Energy Consumption and Cost Estimation for Direct Metal Laser Sintering. (2012).

BAUMERS, Martin *et al.* - The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. **Technological Forecasting & Social Change**. (2014) p. 193–201.

BEER, Ferdinand; JOHNSTON, E. - **Mechanics of Materials**. 4^a ed. Nova Iorque : McGraw-Hill, 2006

BÖHLER - Tool steels for plastic processing seminar. Portugal, 2016.

CAMPO, Alfredo - **The Complete Part Design Handbook For Injection Molding of Thermoplastics**. Texas : Hanser, 2006

CEFAMOL - **Manual de Boas Práticas da Indústria de Moldes**. Marinha Grande : Cefamol, 2006

CRAWFORD, R. - **Plastics Engineering**. 3^a ed. Suffolk : Butterworth-Heinemann, 1998

CUSTOMPARTNET - **Direct Metal Laser Sintering**, atual. 2019. [Consult. 20 jun. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>>.

EMMELMANN, C.; HERZOG, D.; KRANZ, J. - Design for laser additive manufacturing. Em **Laser Additive Manufacturing - Materials, Design, Technologies, and Applications** : Woodhead Publishing, 2007. p. 31, 259–281.

EXONE - **What is Binder Jetting**, atual. 2019. [Consult. 22 mar. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>>.

EXTRUDEHONE - **Abrasive Flow Machining**, atual. 2019. [Consult. 12 jun. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://bit.ly/31xADKR>>.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent - **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. Nova Iorque : Springer, 2010

GOODSHIP, V. - **Arburg Practical Guide to Injection Moulding**: Smithers Rapra Press, 2004

GRANJA, D. *et al.* - **Manual do Projectista Para Molde de Injeção de Plástico**. Marinha Grande : Centimfe, 2006

GU, Dongdong - **Laser Additive Manufacturing of High - Performance Materials**. [S.l.] : Springer, 2015

GÜNTHER - Heisskanaltechnik, 2019.

HERZOG, Dirk *et al.* - Additive manufacturing of metals. **Acta Materialia**. (2016).

IQTEMP - **Refrigeração Conformada por Excelência**, atual. 2019. [Consult. 12 jun. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://bit.ly/2WHV498>>.

ISO/ASTM - **Additive manufacturing - General principles - Terminology**, atual. 2015. [Consult. 10 ago. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>.

JACKSON, David - **European Space Agency funds TCD engineers' Cold Spray 3D printing**, atual. 2015. [Consult. 19 abr. 2019]. Disponível em WWW:<URL:http://www.engineersjournal.ie/2015/02/10/trinity-cold-spray-technology-esa/>.

JODOIN, Bertrand; GARTNER, Franck; IRISSOU, Eric - **Thermal Spray Processes. The 2016 Thermal Spray Roadmap**.(2016).

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. - **Manufacturing, Engineering and Technology**. 6^a ed. Canada : Pearson Education, 2009

KAMAL, Musa - **Injection Molding - Technology and Fundamentals**. Munique : Hanser, 2009

KARLSSON, Joakim - Optimization of Electron Beam Melting for Production of Small Components in Biocompatible Titanium Grades. **Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology**. (2015).

KRANZ, J.; HERZOG, D.; EMMELMANN, C. - Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. **Journal of Laser Applications**. (2015).

MAYER, S. - **Optimised mould temperature** : EOS GmbH, 2009

QUERIN, Osvaldo; VICTORIA, Mariano - **Topology Design Methods for Structural Optimization**. 1^a ed. : Academic Press, 2017

QUINTELA, A. - **Hidráulica**. 13^a ed. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 2014

ROSATO, Dominick - **Injection Molding Handbook**. 3^a ed. USA : Springer, 2000

RUFFNER, T. - **Success with Conformal Cooling Using Direct Metal Laser Sintering**

SACHS, E. *et al.* - Production of Injection Molding Tooling with Conformal Cooling Channels using The Three Dimensional Printing Process. Cambridge, 1995.

SHOEMAKER, Jay - **Moldflow Design Guide - A Resource for Plastics Engineers**. 1^a ed. Massachusetts : Moldflow, 2006

SIGMUND, Ole; BENDSØ, Martin P. - **Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications**. 2^a ed. Nova Iorque : Springer, 2003

T.SRIVATSAN; MANIGANDAN, K.; T.SUDARSHAN - **Additive Manufacturing - Viable Techniques, Metals, Advances, Advantages and Applications**. Nova Iorque : CRC Press, 2015

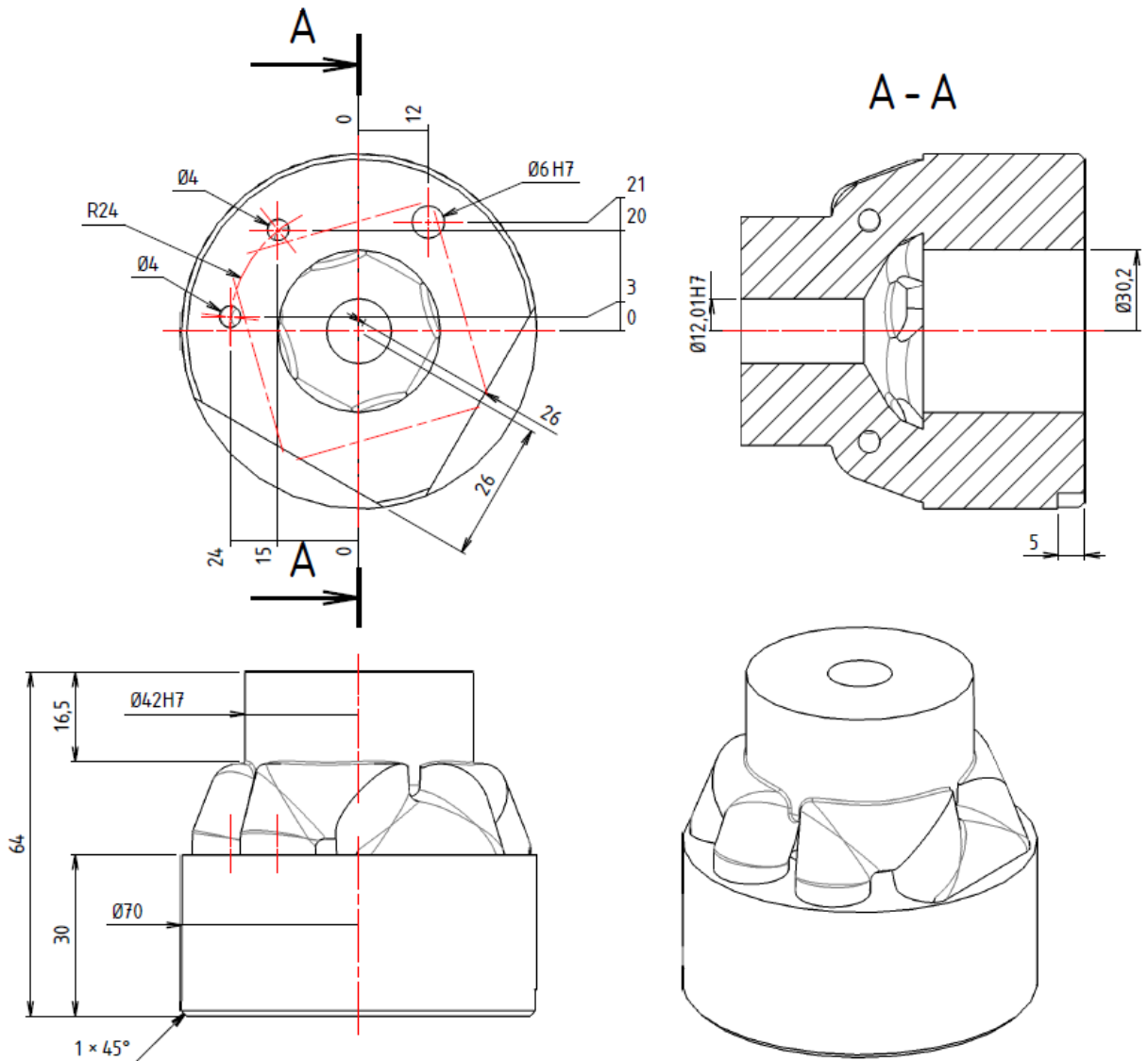
VAROTSIS, Alkaios Bournias - **Introduction to Binder Jetting 3D printing**, atual. 2019. [Consult. 22 mar. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing#what>>.

WHELAN, Tony; GOFF, John - **Injection Molding of Thermoplastic Materials** : Springer, 1990

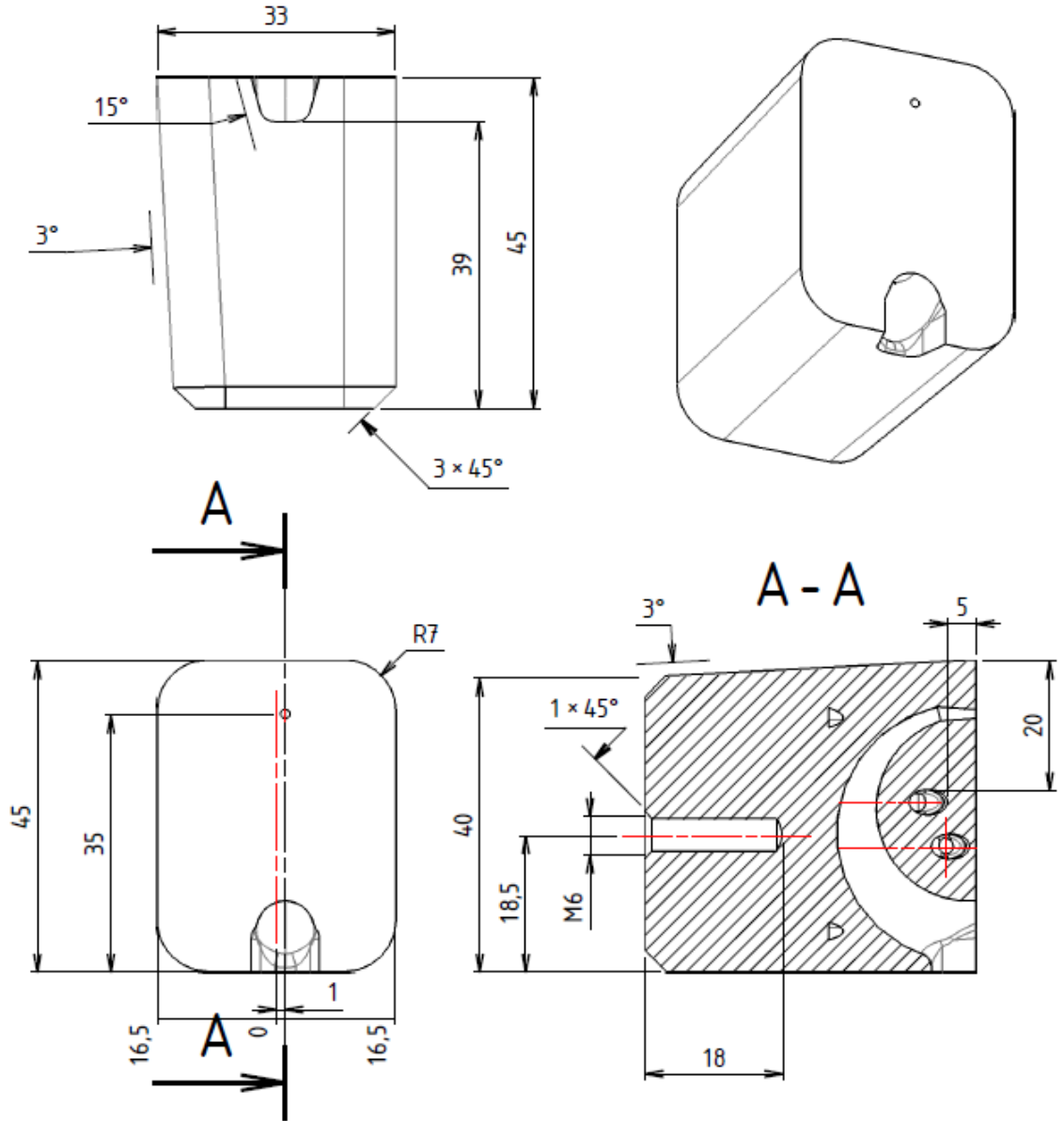
WHITE, Frank - **Fluid Mechanics**. 7^a ed. : McGraw-Hill, 2011

Anexos

Anexo I – Desenho 2D do C ST15/26 MHTO



Anexo II – Desenho 2D do IB ST23/25 MHTO



Anexo III - Ficha técnica do LaserForm® Maraging Steel (B)

LaserForm® Maraging Steel (B)

Maraging Steel fine-tuned for use with ProX® DMP 200 and ProX® DMP 300 metal printers producing industrial parts and tool inserts with a combination of high-strength and excellent hardness.

LaserForm Maraging Steel (B) is formulated and fine-tuned specifically for 3D Systems ProX DMP 200 and 300 metal 3D printers to deliver high part quality and consistent part properties. The print parameter database that 3D Systems provides together with the material has been extensively developed, tested and optimized in 3D Systems' part production facilities that hold the unique expertise of printing 500,000 challenging metal production parts in various materials year over year. For a 24/7 production operation 3D Systems' thorough Supplier Quality Management System guarantees consistent, monitored material quality for reliable process results.

Material Description

With properties like 1.2709, this steel is easily heat-treatable in a simple age-hardening process resulting in excellent hardness and strength. LaserForm Maraging Steel (B) has good wear resistance. In regards to post-processing, the material shows good weldability and machinability. LaserForm Maraging Steel (B) is ideal for innovative tool and mold designs including conformal cooling channels for injection molding, die casting and extrusion. The material is also used for high-performance aerospace, automotive and other industrial applications which require high strength and wear resistance.

Classification

The chemical composition of LaserForm Maraging Steel (B) with

Mechanical Properties^{1,2}

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC			U.S.		
		AS BUILT	AFTER STRESS RELIEF	AFTER AGEING	AS BUILT	AFTER STRESS RELIEF	AFTER AGEING
Young's modulus (GPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY		160 ± 30	160 ± 20	185 ± 20	23200 ± 4400	23200 ± 2900	26800 ± 2900
Vertical direction - Z		145 ± 30	155 ± 20	165 ± 20	21000 ± 4400	22500 ± 2900	24000 ± 2900
Ultimate strength (MPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY		1180 ± 20	1130 ± 20	2190 ± 50	170 ± 3	165 ± 3	320 ± 7
Vertical direction - Z		1050 ± 40	1100 ± 40	2140 ± 50	150 ± 6	160 ± 6	310 ± 7
Yield strength Rp0.2% (MPa ksi)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY		950 ± 60	800 ± 50	1870 ± 80	140 ± 9	115 ± 7	270 ± 12
Vertical direction - Z		780 ± 60	790 ± 50	1750 ± 80	115 ± 9	115 ± 7	255 ± 12
Elongation at break (%)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY		13 ± 3	13 ± 3	3 ± 1.5	13 ± 3	13 ± 3	3 ± 1.5
Vertical direction - Z		13 ± 3	13 ± 3	1.5 ± 0.5	13 ± 3	13 ± 3	1.5 ± 0.5
Reduction of area (%)	ASTM E8M						
Horizontal direction - XY		55 ± 5	55 ± 10	12 ± 5	55 ± 5	55 ± 10	12 ± 5
Vertical direction - Z		60 ± 5	50 ± 10	7 ± 5	60 ± 5	50 ± 10	7 ± 5
Hardness, Rockwell C	NF EN ISO 6508-1	36 ± 2	33 ± 2	55 ± 3	36 ± 2	33 ± 2	55 ± 3

¹ Parts manufactured with standard parameters on ProX® DMP 200 and ProX® DMP 300
² Values based on average and double standard deviation

Thermal Properties¹

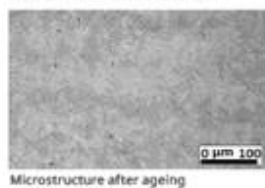
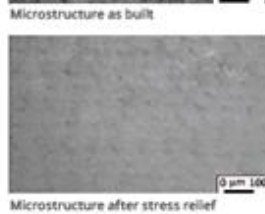
MEASUREMENT	CONDITION	METRIC	U.S.
Thermal conductivity (W/(m.K) Btu/(h.ft.°F))	at 20°C / 120 °F	20.9	12.1
CTE - Coefficient of thermal expansion (µm/(m.°C) µ inch/(inch . °F))	In the range of 20 to 600 °C	10	5.6
Melting range (°C °F)		1430 - 1450	2610 - 2640

Electrical Properties¹

MEASUREMENT	METRIC	U.S.
Electrical resistivity (µΩ.m µΩ.in)	0.44	17.32

Physical Properties

MEASUREMENT	METRIC		U.S.
	AS BUILT, AFTER STRESS RELIEF AND AFTER AGEING	AS BUILT, AFTER STRESS RELIEF AND AFTER AGEING	AS BUILT, AFTER STRESS RELIEF AND AFTER AGEING
Density			
Relative, based on pixel count ² (%)		>99.5	
Absolute theoretical ² (g/cm ³ lb/in ³)	8.06		0.291



Anexo IV – Ficha técnica do PP Hifax CB 1158 G



Hifax HSBM CB 1158 G

Compounded Polyolefin

Product Description

"Hifax" HSBM CB 1158 G is a high flow, 10% mineral filled high impact polypropylene copolymer suitable for injection moulding. The grade has been specifically designed for moulding large complex parts that require high impact strength as well as good stiffness. This grade is available in custom colour, pellet form.

Product Characteristics

Status	Commercial: Active
Test Method used	ISO
Availability	Europe, Asia-Pacific, Australia/NZ, Africa-Middle East, Latin America
Features	Impact Copolymer, High Impact Resistance , Good Stiffness , Non Toxic
Typical Customer Applications	Exterior Applications, Bumpers

Typical Properties	Method	Value Unit
Physical		
Density (Method A)	ISO 1183	0.980 g/cm ³
Melt flow rate (MFR) (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	15 g/10 min
Mechanical		
Flexural modulus	ISO 178	1450 MPa
Impact		
Notched izod impact strength (23 °C, Type 1, Notch A)	ISO 180	No Break kJ/m ²
(-40 °C, Type 1, Notch A)		5.00 kJ/m ²
Thermal		
Heat deflection temperature B (0.45 MPa) Unannealed	ISO 75B-1, -2	94.0 °C
Vicat softening temperature (B50 (50°C/h 50N))	ISO 306	51.0 °C

Notes

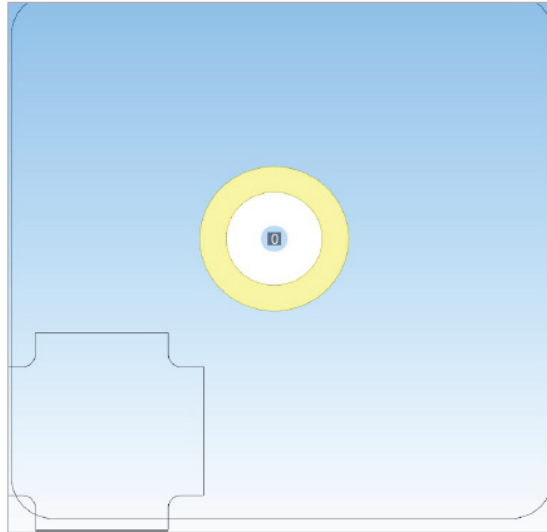
Typical properties; not to be construed as specifications.

Anexo V – Relatório DMP do C ST15/26 MO

Esta página foi intencionalmente deixada em branco



Report :ST1526_Casquilho_3D_190512.FAB3



Resume

Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	26h : 25min : 39s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm ³)	156424
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	102

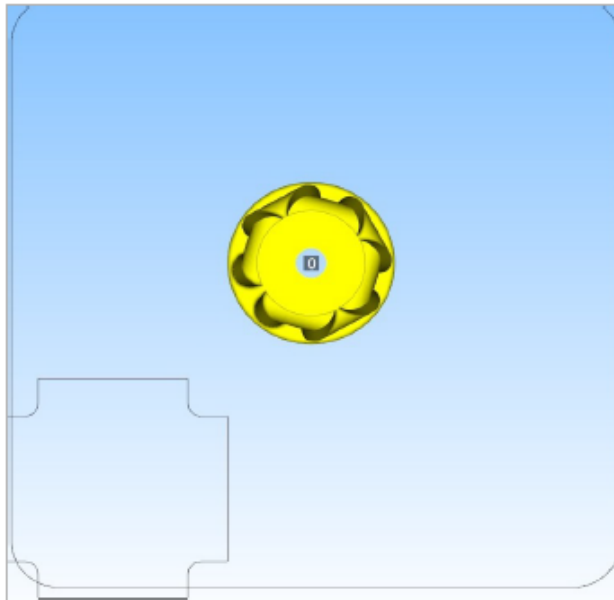
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)
0	ST1526_Casquilho_3D_190512(Part - Hex. sintering)	15h : 29min : 18s	10.00	74.00	151674
1	ST1526_Casquilho_3D_190512_Support - Grid(Support - Grid)	1h : 10min : 31s	0.00	10.08	4750
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)

Anexo VI – Relatório DMP do C ST15/26 MTO

Esta página foi intencionalmente deixada em branco



Report :ST_TopOpt_190509.FAB3



Resume

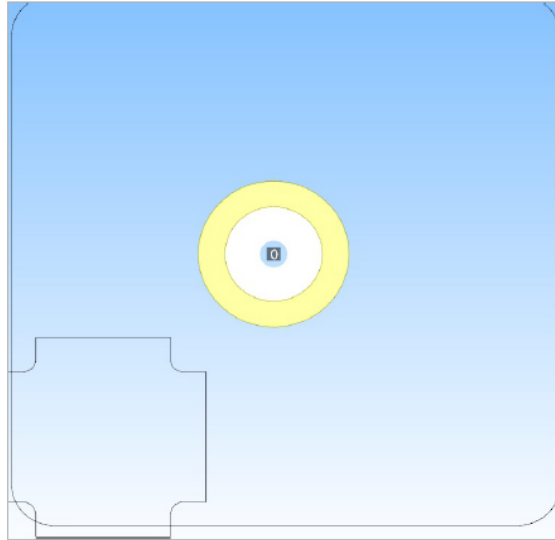
Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	20h : 57min : 33s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm ³)	102088
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	102

id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)
0	ST_TopOpt_190509(Part - Hex. sintering)	10h : 8min : 58s	10.00	74.00	97728
1	ST_TopOpt_190509_Support - Grid(Support - Grid)	1h : 4min : 45s	0.00	10.08	4358
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)

Anexo VII – Relatório DMP do C ST15/26 MHO



Report :ST1526_Casquilha_3D_Hibrido_190512.FAB3



Resume

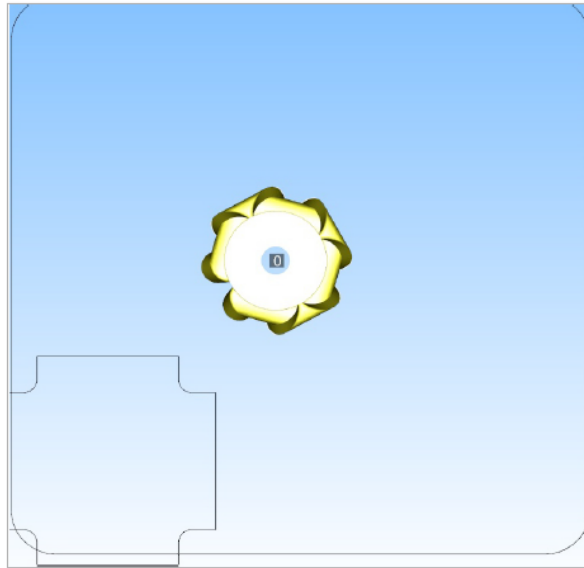
Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	11h : 42min : 3s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm ³)	70684
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	46.8

id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)
0	ST1526_Casquilha_3D_Hibrido_190512(Part - Hex. sintering)	7h : 12min : 53s	0.00	34.00	70684
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)

Anexo VIII – Relatório DMP do C ST15/26 MHTO



Report :ST_TopOpt_Hibrido_190509.FAB3



Resume

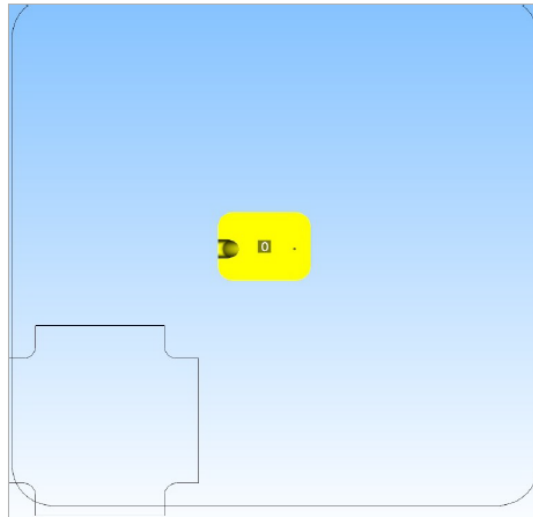
Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	9h : 46min : 57s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm ³)	51344
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	46.8

id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)
0	ST_TopOpt_Hibrido_190509(Part - Hex. sintering)	5h : 17min : 47s	0.00	34.00	51344
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)

Anexo IX – Relatório DMP do IB ST30/40 MO



Report :ST3040_Banana_3D_190420.FAB3



Resume

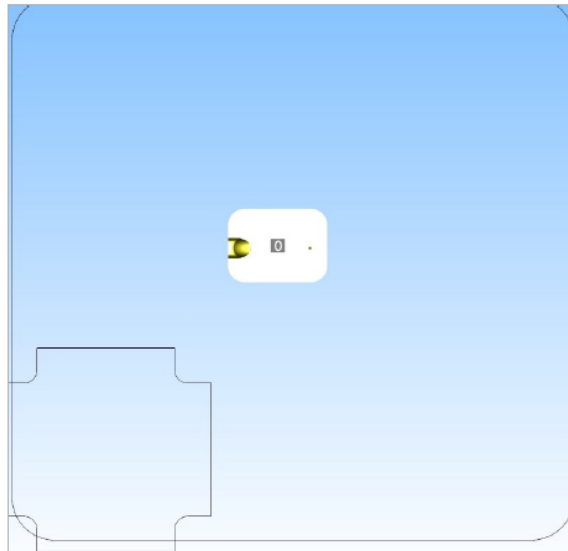
Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	13h : 5min : 44s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm³)	55046
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	75.6

id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm³)
0	ST3040_Banana_3D_190420(Part - Hex. sintering)	5h : 29min :35s	10.00	55.00	53657
1	ST3040_Banana_3D_190420_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 20min :44s	0.00	10.08	1389
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm³)

Anexo X – Relatório DMP do IB ST30/40 MTO



Report :ST3040_Banana_TopOpt_190509_2.FAB3



Resume

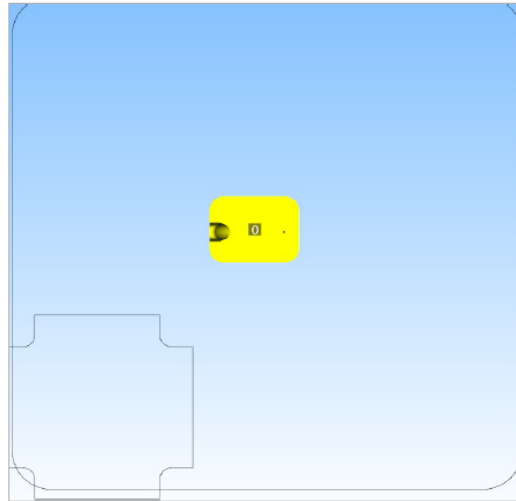
Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	12h : 13min : 45s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm³)	45112
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	75.6

id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm)
0	ST3040_Banana_TopOpt_190509_2(Part - Hex. sintering)	4h : 37min : 35s	10.00	55.00	43731
1	ST3040_Banana_TopOpt_190509_2_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 20min : 45s	0.00	10.08	1381
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm)

Anexo XI – Relatório DMP do IB ST30/40 MHO



Report :ST3040_Banana_3D_Híbrido_190420.FAB3



Resume

Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	5h : 9min : 3s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm ³)	24489
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	27.5

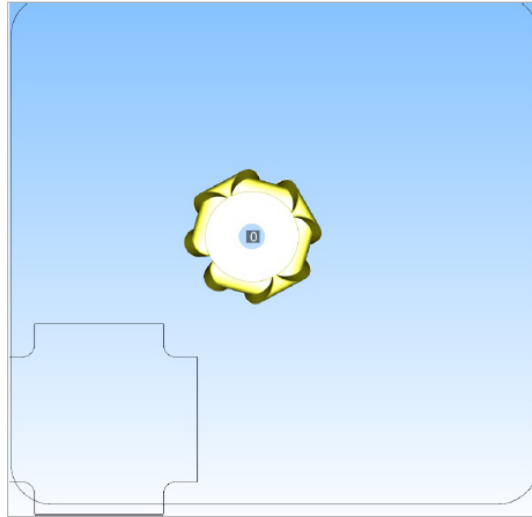
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)
0	ST3040_Banana_3D_Híbrido_190420(Part - Hex. sintering)	2h : 30min :43s	0.00	20.00	24489

id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)
----	--------	----------------	-----------	-----------	-------------------------------------

Anexo XII – Relatório DMP do IB ST30/40 MHTO



Report :ST_TopOpt_Hibrido_190509.FAB3



Resume

Number of sliced objects	1
Database	ProX300_ST2709B_C03.db
Manufacturing time	9h : 46min : 57s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm ³)	51344
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	46.8

id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)
0	ST_TopOpt_Hibrido_190509(Part - Hex. sintering)	5h : 17min : 47s	0.00	34.00	51344
id	Object	Sintering time	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Estimated volume (mm ³)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco