



Fabrico aditivo aplicado ao projeto de moldes para vidro - Conformalflow

Mestrado em Product Design Engineering

Pedro Alexandre Jesus Sereno

Leiria, setembro de 2022

Fabrico aditivo aplicado ao projeto de moldes para vidro - Conformalflow

Mestrado em Product Design Engineering

Pedro Alexandre Jesus Sereno

Trabalho de Dissertação realizado sob a orientação do Professor Doutor José Manuel Couceiro Barosa Correia Frade e do Professor Doutor Artur Jorge dos Santos Mateus.

Leiria, setembro de 2022

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de dissertação 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 Product Design Engineering, 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.

Resumo

O presente trabalho pretende investigar os processos de conformação de vidro e de fabrico de moldes e apresentar uma solução competitiva e incrementos para melhorar o desempenho do processo de conformação produtos de vidro com alta complexidade de forma.

A otimização do molde para conformação de vidro através das vantagens proporcionadas pelo fabrico aditivo (FA), como canais conformáveis para arrefecimento da ferramenta moldante é ainda pouco ou nada estudada e esse será o foco da presente investigação. O fabrico aditivo já encontra aplicação na produção de canais de arrefecimento conformáveis em insertos para moldes de termoplásticos de alto desempenho, em que o aumento do custo da ferramenta é mitigado pelo aumento na eficiência do processo, no incremento da qualidade das peças produzidas e na redução de tempos e custos de produção.

Foram desenvolvidos provetes para permitir o teste de desempenho a várias geometrias de canais de arrefecimento conformáveis para comparação com o método tradicional de arrefecimento denominado Vertiflow. Foi concebido e desenvolvido um DoE (*Design of experiments*) para testar o desempenho dos provetes, demonstrando-se efetivo, permitindo a recolha de dados e resultados para análise, discussão e para gerar conclusões do presente trabalho.

Foram realizadas simulações preliminares, cujos resultados evidenciaram a maior eficiência da alternativa de molde com canais de arrefecimento conformáveis (Conformalflow) comparativamente com o molde com a tecnologia convencional (Vertiflow).

O presente trabalho conclui que, no geral, as geometrias com canais conformáveis de arrefecimento apresentam melhor desempenho e eficiência na redução da temperatura da superfície moldante. As geometrias com canais conformáveis circulares apresentam um menor gradiente térmico na superfície, que é uma propriedade importante para melhorar a qualidade do produto final em vidro. As geometrias com canais conformáveis elípticos potenciaram a maior redução de temperatura à superfície moldante. Foi possível verificar que o provete com inclusão de alhetas no interior dos canais elípticos registou a maior redução de temperatura na superfície moldante.

Palavras-chave: Vidro, Moldes, Tooling, Conformável, Arrefecimento, FA

Abstract

This work aims to investigate the processes of glass forming and mould manufacturing and present a competitive solution and increments to improve the performance of the glass products forming process with high shape complexity.

The optimization of the mould for glass forming through the advantages provided by additive manufacturing (AM), as conformal cooling channels for glass moulding tools are still little or nothing studied, will be the focus of this research. Additive manufacturing already finds application in the production of conformal cooling channels in inserts for high performance thermoplastic moulds, in which the increase in tool cost is mitigated by the increase in process efficiency, in the increase of the quality of the parts produced and in reducing production times and costs.

Test specimens have been developed to allow performance testing to various conformal cooling channel geometries compared to the traditional cooling method called Vertiflow. A *Design of Experiments* (DoE) was developed to test the performance of the specimens, demonstrating effectiveness, allowing the collection of data and results for analysis, discussion and to generate conclusions of the present work.

Preliminary simulations were performed, the results of which showed the highest efficiency of the mould alternative with conformal cooling channels (Conformalflow) compared to the mould with conventional technology (Vertiflow).

Overall, the presented work concludes that all the tested geometries with conformal cooling channels have better performance and efficiency in reducing the temperature of the moulding surface. Geometries with circular conformal cooling channels have a lower thermal gradient on the surface, which is an important property to improve the quality of the final product in glass. Geometries with elliptical conformal cooling channels enhanced the greatest temperature reduction to the moulding surface. It was possible to verify that the specimen with inclusion of fins inside the elliptical channels recorded the greatest temperature reduction on the moulding surface.

Keywords: Glass, Molds, Tooling, Conformal, Cooling, AM

Conteúdos

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviações e Acrónimos	xvi
1. Introdução	1
1.1. Contexto e Motivação	1
1.2. Objetivos e Métodos	5
1.3. Estrutura da Dissertação	7
2. Estado da Arte	9
2.1. Processo produtivo do vidro de embalagem	9
2.1.1. Composição	9
2.1.2. Moldação	10
2.1.3. Processos de Conformação	12
2.2. Soluções inovadoras no projeto de ferramentas por fabrico aditivo	23
3. Soluções Propostas e procedimento experimental	29
3.1. Molde caso de estudo – Desenho e simulações preliminares	29
3.2. Materiais do molde	39
3.3. Topologia	40
3.4. Problemas encontrados e ações de mitigação	46
3.5. Provetes	47

3.5.1.	Conceção e desenvolvimento da peça para alimentar o ar para arrefecimento dos canais.....	59
3.5.2.	DoE aplicado aos provetes	61
4.	Análise de Resultados e Discussão	68
4.1.	Ensaio realizado a 200°C.....	68
4.2.	Ensaio realizado a 500°C.....	73
4.3.	Ensaio realizado a 650°C.....	77
4.4.	Outras ponderações.....	80
4.4.1.	Ensaio realizado a 500°C.....	81
4.4.2.	Ensaio realizado a 650°C.....	83
5.	Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros.....	85
6.	Referências Bibliográficas	88
7.	Anexo A	92
7.1.	Ensaio realizado a 200°C.....	92
7.2.	Ensaio realizado a 500°C.....	94
7.3.	Ensaio realizado a 650°C.....	97

Lista de Figuras

Figura 1 - Máquina IS de 8 secções.....	11
Figura 2 - Componentes do molde de iniciar de um frasco de compota.....	13
Figura 3 - Componentes do molde de acabar de um frasco de compota.	13
Figura 4 - Imagem do processo soprado-soprado. À esquerda: párison soprado já invertido aguardando o fecho do molde final. À direita: embalagem conformada pelo molde final.	14
Figura 5 - Esquemática do processo soprado-soprado.....	15
Figura 6 - Exemplos de embalagens obtidas pelo processo SS (soprado-soprado). Garrafa de Mateus Rosé 375ml e frasco de perfume 75ml.	15
Figura 8 - Exemplo de embalagem produzida por prensado-soprado.	17
Figura 7 - Esquema da patente do molde de iniciar sem costura da Owens-Illinois, US Patent 5,900,035[5].	16
Figura 9 - Esquema do processo prensado-soprado.....	17
Figura 10 - Exemplo de embalagem produzida por NNPB e o seu molde de acabar.	18
Figura 11 - Esquema do processo NNPB.	18
Figura 12 - Módulo de arrefecimento radial para máquinas IS da Heye International GmbH [11]	19
Figura 13 - Solução para ventilação contínua dos moldes pela Heye International GmbH [12].	20
Figura 14 - Otimização de processo com aquisição de dados em tempo real em sistemas da Heye International GmbH.....	21
Figura 15 - Molde de acabar para frasco de compota.....	22
Figura 16 - Exemplos de geometrias de garrafas alternativas de maior complexidade de forma.	22
Figura 17 - Representação esquemática do conceito de ventilação do molde final para produção do cantil. Esq: Vertiflow. Dir: Conceito de canais conformáveis Conformalflow.	23
Figura 18 - Comparação entre refrigeração tradicional e uma solução com canais conformáveis para a mesma peça. (Imagem retirada de https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/).....	24
Figura 19 - Esquema do processo SLM. Adaptado do trabalho de Ali Alagha (DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109654)	24
Figura 20 - Varrimento laser na camada durante o processo SLM.....	25
Figura 21 - Canais conformáveis vascularizados (biomimética). Do estudo de Berger et all [16].	26
Figura 22 - Canal circular e canal circular com design de alhetas direcionais. Do estudo de Freitas et all [17].	27
Figura 23 - Geometria da alheta triangular. Retirado do estudo de Roy et all [18]	27
Figura 24 - Exemplos de estruturas em treliça auto suportáveis. Retirado do estudo de Pavel Hanzl et all [19].	28

Figura 25 - Desenho técnico do molde de acabar do cantil de Mateus Rosé 33cl.	30
Figura 26 - CAD 3D do molde tradicional simplificado e representação do volume computacional.....	31
Figura 27 - CFD do molde Vertiflow.	33
Figura 28 - CAD 3D do molde Conformalflow simplificado e representação do volume computacional.	34
Figura 29 - CFD do molde Conformalflow.	35
Figura 30 - Identificação da zona para desenvolvimento da estrutura de treliça.	36
Figura 31 - CFD do molde com canais conformáveis.	38
Figura 32 - CFD do molde tradicional Vertiflow.	38
Figura 33 - Molde Vertiflow tradicional.	41
Figura 34 - Molde preliminar com canais conformáveis com volume maciço substituído por estruturas em treliça (Diamante 20%, 10mm).	43
Figura 35 - Molde preliminar conformável com volume maciço substituído por estruturas em treliça (Rômbo dodecaedro 20%, 10mm).	44
Figura 36 - Molde preliminar conformável com volume maciço substituído por estruturas em treliça (Dode fino, 30mm).	45
Figura 37 - Distância do canal tradicional Vertiflow à superfície moldante em vários pontos do molde.	48
Figura 38 - Esquema dos provetes desenvolvidos. À esquerda de cada conjunto: vista de corte do canal. À direita do conjunto: vista de topo ou saída do canal.	49
Figura 39 - Fotografia dos provetes desenvolvidos.	49
Figura 40 - Vista de corte do provete G#2. Pormenor do volume substituído por treliças, geometria do canal e acabamento rugoso próprio do SLM.	50
Figura 41 - CAD do provete G#1 Vertiflow.	50
Figura 42 - Fotografia do provete G#1.	51
Figura 43 - CAD do provete G#2 Conformável Circular.	51
Figura 44 - Fotografia do provete G#2 Conformável Circular.	52
Figura 45 - a) Resultados de simulação CFD ao canal de secção constante ($V_{max}:8,537m/s$; $V_{min}:2,914m/s$); b) Resultados de simulação CFD ao canal de secção variável ($V_{max}:11,907m/s$; $V_{min}:3,996m/s$); c) Geometria final do canal.	52
Figura 46 - Fotografia da vista em corte do provete G#2.	53
Figura 47 - CAD do provete G#2.1 Conformável Circular sem treliças.	53
Figura 48 - Fotografia do provete G2.1.	54
Figura 49 - CAD do provete G#2.2 Conformável Circular secção constante.	54
Figura 50 - Fotografias do provete G#2.2.	55

Figura 51 - CAD do provete G#3 - Conformável Elíptico	55
Figura 52 - Fotografias do provete G#3.	56
Figura 53 - Vista de corte do provete G#3.	56
Figura 54 - CAD do provete G#4 - Conformável Elíptico com Alhetas.	57
Figura 55 - Fotografias do provete G#4.	57
Figura 56 - Pormenor da geometria das alhetas trapezoidais	58
Figura 57 - Simulação para verificar a influência da peça plástica para passagem do ar comprimido para as experiências. Ponteira v1	59
Figura 58 - Simulação para verificar a influência da peça plástica para passagem do ar comprimido para as experiências. Ponteira v2.....	60
Figura 59 - Fotografias das ponteiras produzidas. ABS e Ti6Al4V.	61
Figura 60 - Forno/estufa ALPINA EASYLINE.	62
Figura 61 - Termómetro digital infravermelho XINDAR TID200.....	63
Figura 62 - Forno elétrico TERMOLAB MLR.	63
Figura 64 – Esquema da configuração experimental dos ensaios realizadas	64
Figura 63 - Câmera termográfica FLIR A655SC.	64
Figura 65 - Fotografia da realização dos testes aos provetes a baixa temperatura (200°C)	64
Figura 66 - Fotografia da realização dos testes aos provetes a alta temperatura (500°C e 650°C)	65
Figura 67 - Bancada de trabalho, material de enfora (refratários), luvas de proteção e pistola de ar com a ponteira desenvolvida instalada.....	66
Figura 68 - Software ResearchIR utilizado para aquisição e tratamento das filmagens termográficas no decorrer das experiências.....	66
Figura 69 - Identificação das zonas de medição de temperatura na superfície moldante do provete e do sentido do fluxo de ar.....	67
Figura 70 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de alimentação do fluxo de ar (ensaios realizados a 200°C).....	68
Figura 71 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção central dos provetes (ensaios realizados a 200°C).....	69
Figura 72 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de saída dos canais (ensaios realizados a 200°C).....	70
Figura 73 - Gráfico da temperatura média da superfície dos provetes versus tempo (ensaios realizados a 200°C)	71
Figura 74 - Gráfico de variação térmica em percentagem ao longo do tempo dos vários provetes (ensaios realizados a 200°C).....	72

Figura 75 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de alimentação do fluxo de ar (ensaio realizado a 500°C).....	73
Figura 76 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção central (ensaio realizado a 500°C).....	74
Figura 77 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de saída dos canais (ensaio realizado a 500°C).....	75
Figura 78 - Gráfico da temperatura média da superfície dos provetes versus tempo (ensaio realizado a 500°C).....	76
Figura 79 - Gráfico de variação térmica em percentagem ao longo do tempo dos vários provetes (ensaio realizado a 500°C).....	77
Figura 80 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de alimentação do fluxo de ar (ensaio realizado a 650°C).....	77
Figura 81 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção central (ensaio realizado a 650°C).....	78
Figura 82 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de saída dos canais (ensaio realizado a 650°C).....	79
Figura 83 - Gráfico da temperatura média da superfície dos provetes versus tempo (ensaio realizado a 650°C).....	79
Figura 84 - Gráfico de variação térmica percentual ao longo do tempo dos vários provetes (ensaio realizado a 650°C).....	80
Figura 85 - Gráfico de variação térmica percentual da superfície moldante versus tempo ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaio realizado a 500°C).....	82
Figura 86 - Gráfico de temperatura média da superfície versus tempo dos vários provetes ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaio realizado a 500°C).....	82
Figura 87 - Gráfico de temperatura média da superfície versus tempo dos vários provetes ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaio realizado a 650°C).....	83
Figura 88 - Gráfico de variação térmica percentual da superfície moldante versus tempo ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaio realizado a 650°C).....	84

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais constituintes do vidro soda-cal. Origem: BA Glass.....	10
Tabela 2 - Principais processos para fabrico de vidro de embalagem.	12
Tabela 3 - Dados de entrada para simulação com vidro a 800°C.	32
Tabela 4 - Levantamento de valores de temperatura e respetivas referências bibliográficas.	36
Tabela 5 - Dados de entrada para simulação com vidro a 1000°C.	37
Tabela 6 - Materiais para a indústria de vidro (adaptado de Aços para Ferramentas de Pinto Soares).	39
Tabela 7 - Materiais adequados à fabricação de moldes para vidro em bulk e materiais em pó para fabrico aditivo. (adaptado de Aços para Ferramentas de Pinto Soares).....	39
Tabela 8 - Volume, densidade do material e massa do molde Vertiflow.	41
Tabela 9 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis e volume maciço. ..	42
Tabela 10 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis (estrutura diamante 20% 10mm).	43
Tabela 11 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis (estrutura rômica dodecaedro 20% 10mm).	44
Tabela 12 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis (estrutura dode fino 30mm).	45
Tabela 13 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#1 – Vertiflow (ensaios 200°C).....	92
Tabela 14 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2 - Conformável Circular (ensaios 200°C).....	92
Tabela 15 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.1 - Conformável Circular sem treliças (ensaios 200°C)	93
Tabela 16 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.2 - Conformável Circular secção constante (ensaios 200°C).....	93
Tabela 17 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#3 – Conformável Elíptico (ensaios 200°C).....	93
Tabela 18 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas (ensaios 200°C)	94
Tabela 19 - Valores de temperatura média da superfície (ensaios 200°C)	94
Tabela 20 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#1 – Vertiflow (ensaios 500°C).....	95
Tabela 21 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2 – Conformável Circular (ensaios 500°C)	95
Tabela 22 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.1 – Conformável Circular sem treliças (ensaios 500°C)	95
Tabela 23 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.2 – Conformável Circular secção constante (ensaios 500°C).....	96
Tabela 24 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#3 – Conformável Elíptico (ensaios 500°C).....	96

Tabela 25 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas (ensaio 500°C)	96
Tabela 26 - Valores de temperatura média da superfície (ensaio 500°C)	97
Tabela 27 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#1 – Vertiflow (ensaio 650°C)	97
Tabela 28 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2 – Conformável Circular (ensaio 650°C)	98
Tabela 29 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.1 – Conformável Circular sem treliças (ensaio 650°C)	98
Tabela 30 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.2 – Conformável Circular secção constante (ensaio 650°C)	98
Tabela 31 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#3 – Conformável Elíptico (ensaio 650°C)	99
Tabela 32 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas (ensaio 650°C)	99
Tabela 33 - Valores de temperatura média da superfície (ensaio 650°C)	99

Lista de Abreviações e Acrônimos

ESTG	Escola Superior de Gestão e Tecnologia
FA	Fabrico Aditivo
PBLF	Powder Bed Laser Fusion (Fusão a Laser em cama de pó)
SLM	Selective Laser Melting (Fusão seletiva a laser)
SS/BB	Soprado–Soprado/Blown-Blown
PS/PB	Prensado-Soprado/Press-Blown
NNPB	Narrow Neck Press-Blown (Prensado-Soprado de gargalo estreito)
CAD	Computer Aided Design (Design assistido por computador)
CFD	Computer Fluid Dynamics (Dinâmica dos fluidos computacional)
PTA	Plasma Transferred Arc
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
DoE	Design of Experiments
AIVE	Associação dos Industriais de Vidro de Embalagem
IS	Individual Section
BA	Barbosa e Almeida
OI	Owens-Illinois

1. Introdução

O presente trabalho pretende investigar o fabrico de moldes e os processos de moldação de vidro, a fim de entender melhor os requisitos da indústria, e de apresentar uma solução competitiva e incrementos para melhorar o desempenho do processo de conformação de vidro com elevada complexidade de forma.

O fabrico aditivo (FA) já encontra aplicação na produção de canais de arrefecimento conformáveis em insertos para moldes de injeção de termoplásticos de alto desempenho, em que o aumento do custo da ferramenta é mitigado pelo aumento na eficiência do processo, no incremento da qualidade das peças produzidas e na redução de tempos e custos de produção.

Neste trabalho, são desenvolvidas novas abordagens ao projeto de moldes para conformação de vidro considerando os mais recentes avanços no fabrico aditivo de ferramentas, com o objetivo de aumentar a eficiência do processo incorporando estas tecnologias inovadoras na indústria vidreira.

1.1. Contexto e Motivação

O fabrico aditivo levou novas possibilidades para a indústria de ferramentas. A liberdade geométrica é um dos pontos fortes dessas tecnologias e tem vindo a ser estudada e usada para fabricar produtos com geometrias complexas e ferramentas com inserção de canais conformáveis para a indústria de moldes para injeção de termoplásticos. As otimizações do processo de injeção conseguidas com recurso ao FA demonstram que os canais conformáveis podem reduzir significativamente o tempo do ciclo de injeção, traduzindo-se na redução do custo dos produtos conformados, devido ao aumento das respetivas cadências e melhoria na qualidade dos produtos finais. Quanto maior a complexidade geométrica dos moldes para injeção de polímeros, maior a dificuldade em otimizar o arrefecimento do molde com furações tradicionais para a circulação das águas de refrigeração. No caso referido da moldação por injeção, um bom projeto de molde com canais conformáveis pode reduzir o tempo de ciclo até 70%, assim como a ocorrência de defeitos nos produtos finais (empenos, contrações) [1].

A indústria de vidro automático, de produção em grandes séries, pode ser considerada como um setor em estagnação. A embalagem de vidro produzida por este setor é pouco diferenciada e qualquer geometria mais complexa encontra problemas na sua produção em grandes séries.

Na atualidade, do ponto de vista de design, a indústria que apresenta maior diferenciação ao nível de geometrias de embalagens de vidro é a indústria cristaleira.

Os processos de produção de vidro cristal são em grande parte manuais, demorando bastante mais tempo para produzir uma embalagem, a taxa de rejeição é bastante elevada e os produtos resultantes são considerados *premium*. A embalagem de cristal é usada, fundamentalmente, para conter bebidas espirituais e destilados em que a sua exposição em loja é também diferenciada pela forma da embalagem e não apenas pelo rótulo. As matérias-primas são diferentes, pois no setor de vidro automático de embalagem o principal tipo de vidro é sódico-cálcico (soda-lime), geralmente com composição adaptada para obter diferentes cores e propriedades nos produtos. No caso dos vinhos e cerveja é necessário que a embalagem tenha uma cor mais escura (âmbar, castanho, verde, etc) que funcione como filtro na proteção do conteúdo à ação da luz. Os frascos que contêm alimentos são geralmente transparentes para que se possa observar facilmente o conteúdo dos mesmos.

Neste momento a principal diferenciação nas embalagens de vidro automático são os rótulos, mesmo para vinhos *premium*, e em alguns licorosos, a diferenciação ao nível de geometria de embalagem é muito baixa.

Este trabalho pretende aplicar novas abordagens ao design de moldes para conformação de embalagem em vidro de modo a tornar possível uma maior diferenciação ao nível da geometria do produto final nomeadamente no setor de vidro automático.

Muitos autores já exploraram as vantagens do FA para a otimização de ferramentas para moldação por injeção de termoplásticos, havendo, no entanto, falta de literatura especializada nesta área para a moldação de vidro, que se integra dentro duma das maiores indústrias da Marinha Grande. Desde empresas de fabricação de moldes até empresas com linhas de produção em larga escala, a indústria do vidro tem um grande impacto na economia do país. O setor de embalagem de vidro é dos mais impactantes nos volumes de produção e exportação desta indústria em Portugal. Dados estatísticos permitem à

AIVE (Associação dos Industriais de Vidro de Embalagem) afirmar que “a Marinha Grande é o maior centro de produção vidreira a nível mundial”, ainda segundo a AIVE, as empresas do setor presentes na Marinha Grande “representam 55% da capacidade de produção instalada a nível nacional” [2].

A geometria das embalagens é dependente do processo de fabrico, sendo que uma embalagem com formas mais complexas é preferencialmente produzida por meios semiautomáticos e manuais devido à dificuldade em moldar de forma automática estes produtos. Estas restrições resultam da dificuldade em arrefecer moldes de forma uniforme e conseguir atingir cadências produtivas relativamente altas. A implementação de canais conformáveis para moldes de vidro pode desbloquear a produção de geometrias complexas e mais atrativas ao consumidor final, acrescentando valor na cadeia de valor do produto. No contexto atual das embalagens de vidro, nomeadamente garrafas, com geometrias mais elegantes do ponto de vista de design, são utilizadas para produtos *premium* justificando o custo mais elevado da embalagem.

Para que as empresas com produtos de gama média/alta se consigam diferenciar com embalagens mais atrativas para o consumidor, é necessário tornar possível a produção de produtos com geometrias complexas, com moldes compatíveis com cadências de produção relativamente elevadas. Estas empresas podem então comercializar os seus produtos, em embalagens diferenciadas, sem recorrer aos métodos tradicionais manuais que encarecem demasiado o recipiente, enaltecendo o valor do design nesta área, acrescentando valor ao produto final e mitigando o custo mais elevado dos moldes com canais conformáveis.

Os custos energéticos na produção das embalagens representam aproximadamente 70 a 80% do custo do produto final, sendo este o maior custo da atividade das empresas de conformação de vidro.

As altas temperaturas de trabalho do vidro não permitem o uso de refrigeração líquida. A gota de vidro cai à temperatura aproximada de 1150°C no molde de pré-forma que remove o calor do *parison* (nome dado à pré-forma) e, em seguida, recorre a ventilação para forçar a convecção e a troca de calor para permitir que a temperatura do molde se mantenha dentro de um determinado intervalo térmico. Após a temperatura do vidro descer para aproximadamente 850°C a 950°C, gama de temperatura a que o vidro ainda é moldável, dá-se a moldação por sopro de ar no molde final. Nos processos de moldação de

embalagens, o arrefecimento através do ar é usado para otimizar o tempo do ciclo e para conferir rigidez ao vidro, compatível com a extração dos produtos conformados a cerca de 600 a 650°C, sem deformar durante a linha de transporte para as arcas de recozimento ou de têmpera.

Normalmente, os sistemas de compressão de ar e ventilação estão localizados no andar abaixo das linhas de produção, onde a temperatura é mais fácil de estabilizar. Para a indústria de transformação de vidro automático, o clima do país influencia diretamente os requisitos de ventilação, devido ao diferencial de temperatura ambiente. Há um aumento no custo de moldação de vidro para países com clima mais quente, pois mais energia e tempo é desperdiçada na ventilação dos moldes para uma cadência igual ou menor.

A otimização do molde para fabricação de vidro através das vantagens proporcionadas pelo FA, como por exemplo canais de ar conformáveis para arrefecimento da ferramenta, é presentemente pouco ou nada estudada e esse será o foco da presente investigação.

A indústria de fabrico de moldes para a conformação de vidro ainda opera com o conhecimento adquirido por tentativa, erro e experimentação e os clientes tendem a mostrar alguma resistência à mudança, preferindo a opção de ferramentas de baixo preço. Ao contrário da moldação por injeção de termoplásticos, a indústria vidreira tem a necessidade de continuar a trocar e reparar moldes para manter a qualidade das peças, pois a qualidade da superfície deteriora-se rapidamente, principalmente com os materiais utilizados atualmente como é o caso do ferro fundido cinzento, um dos materiais mais comuns nesta indústria pelo seu baixo custo. Algumas soluções oferecem revestimentos de alto desempenho para um aumento significativo da vida útil da ferramenta. O processo de revestimento é realizado geralmente por meio de deposição por plasma de arco transferido (PTA, *Plasma Transferred Arc*), de um material de alta dureza, autolubrificante e resistente à abrasão na superfície moldante e que permite obter o acabamento requerido por processos de maquinação. Os revestimentos podem ser dados também pelo processo Tig ou Mig para o caso das arestas de fecho do molde, aumentando o custo da ferramenta e a durabilidade da mesma. Normalmente, os metais depositados são ligas com alto teor de níquel ou carboneto de tungsténio para alta dureza e baixo desgaste especialmente nas arestas de contacto no fecho do molde.

A motivação para o desenvolvimento de soluções para aumentar a eficiência da moldação de vidro é potenciada pela falta de investigação sobre ferramentas moldantes nesta indústria, que de alguma forma não tem vindo a incorporar os recentes avanços das tecnologias de FA, que já chamaram a atenção dos fabricantes e projetistas de moldes para injeção de termoplásticos. O aumento da eficiência e a redução dos custos são aspetos muito atraentes para o setor de moldação de vidro, mas a falta de contato com as comunidades científicas, académicas e tecnologias alternativas criou uma certa inércia para o seu desenvolvimento.

Extrapolar para as ferramentas do vidro algumas soluções que se têm vindo a implementar recentemente na engenharia das ferramentas moldantes para plástico, nomeadamente canais conformáveis de arrefecimento para moldes de geometria complexa através de FA, aparenta ser uma importante oportunidade de investigação. Possibilitar a produção de embalagens com geometrias diferenciadas, tendo em conta incrementar a eficiência e aumentar a qualidade do produto final de vidro são fatores de motivo do presente trabalho. Pretende-se também gerar conhecimento na área, e provar o conceito de que as tecnologias de FA podem trazer benefícios à indústria vidreira.

1.2. Objetivos e Métodos

Na fase inicial do presente trabalho, de modo a definir a linha de ação e identificar oportunidades para o desenvolvimento de novas ferramentas moldantes, foi realizado um esforço para entrar em contato com as empresas de conformação de vidro e fabricantes de moldes para entender melhor as problemáticas e as soluções atuais nesta área técnica e científica.

Paralelamente ao estudo dos resultados recentemente publicados na bibliografia específica sobre estas matérias foi feita observação direta no chão de fábrica. Nesse sentido, fizeram-se visitas às empresas Favricri, Vidrexpert e Atlantis, produtores de embalagens de vidro e à Vidrimolde e Intermolde, fabricantes de moldes para a indústria vidreira. Estas visitas revelaram-se uma boa maneira de entender todo o processo de fabrico, desde os moldes de conformação à embalagem final, o contato com técnicos e engenheiros forneceu ainda informações sobre os problemas atuais da indústria.

Tendo em vista atingir os objetivos de aumentar a eficiência e reduzir os custos de energia da ventilação do molde, foi seguida uma determinada metodologia de acordo com os princípios de investigação para obter melhores resultados por meio da conceção, simulação, produção e teste:

- 1. Documentar as condições e variáveis do processo;
- 2. Simulação ao molde convencional;
- 3. Projeto CAD de diferentes geometrias de canais de refrigeração;
- 4. CFD das diferentes propostas;
- 5. Desenvolver novas soluções tendo em conta os resultados das simulações;
- 6. Fabrico das soluções alternativas;
- 7. DoE - Configuração experimental de laboratório.

Documentar as condições e variáveis do processo

-1. Durante a fase inicial, é importante compreender e documentar as variáveis e restrições do processo. Foi feito um esforço para visitar empresas de produção de vidro, conversar com os técnicos e reunir informações importantes sobre as condições de processamento tais como temperaturas, pressões de ar, tempos de ciclo, e outros dados sobre as problemáticas das ferramentas moldantes.

Simulação ao molde convencional

-2. Ao reunir todas as informações sobre o processo, foi realizado um estudo do molde fabricado convencionalmente, nomeadamente os diâmetros dos canais e a distância destes à superfície moldante. Dessa forma, é possível gerar considerações para servir de base ao desenvolvimento das alternativas.

Projeto CAD de diferentes geometrias de canais de refrigeração

-3. Depois de definidas as considerações do estudo dos moldes tradicionais, é possível projetar geometrias alternativas de canais de arrefecimento com vista à otimização da

transferência de calor na superfície, com o objetivo de conseguir temperaturas mais baixas e uma melhor uniformização das mesmas.

CFD das diferentes propostas

-4. A proposta do molde com canais de arrefecimento conformáveis deve ser objeto de simulação CFD para comparar os resultados com o molde tradicional. As condições de entrada devem ser as mesmas.

Desenvolver novas soluções tendo em conta os resultados das simulações

-5. Após análise dos resultados das simulações devem ser ponderadas alterações a efetuar ao desenho do molde com canais de arrefecimento conformáveis.

Fabrico das soluções alternativas

-6. As novas alternativas de moldes com canais de arrefecimento conformáveis serão fabricadas por FA.

DoE - Configuração experimental de laboratório

-7. Os novos designs de moldes serão testados sob condições simplificadas para melhor controlo e exequibilidade em ambiente laboratorial. Serão definidos os equipamentos e a configuração dos experimentos. Desta forma é possível registar e adquirir dados ao nível de redução das temperaturas da superfície moldante e avaliar o gradiente térmico na mesma. Os resultados servirão para validação e medição do desempenho das alternativas.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos principais:

1. Introdução;
2. Estado da arte;
3. Soluções propostas e procedimento experimental;
4. Análise de resultados e discussão;
5. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

No primeiro capítulo da dissertação, é apresentada uma breve introdução ao tema, a motivação pessoal para o envolvimento nesta área do conhecimento técnico e científico, os objetivos e os métodos para o desenvolvimento deste trabalho.

O segundo capítulo descreve o estado da arte, uma revisão de literatura relacionada ao tema é apresentada com ênfase nas tecnologias de fabrico aditivo e de conformação de vidro. Neste capítulo também são apresentados fundamentos para as características inovadoras da dissertação.

No terceiro capítulo, são apresentados os casos de estudo, proposta de soluções, e descritas as tecnologias e os procedimentos experimentais envolvidos, abordando todas as etapas do desenvolvimento do trabalho, assim como os testes realizados à escala laboratorial.

O quarto capítulo é onde os resultados são apresentados, bem como é realizada uma discussão analítica pela observação dos mesmos.

O quinto e último capítulo está reservado a conclusões gerais da dissertação, crítica e sugestões para trabalhos futuros relacionados à temática abordada.

2. Estado da Arte

Esta seção apresenta o estado atual da indústria e os processos de moldação de vidro, para entender melhor as tecnologias envolvidas e as diferentes variações de processos com foco na indústria de embalagem de vidro que, como mencionado anteriormente, tem o maior impacto na indústria local.

Os processos de fabrico de ferramentas para moldação de vidro também são discutidos para perceber a atual metodologia na sua construção, tecnologias, requisitos de material e outras especificações técnicas. Isso fornecerá uma base de estudo para definir uma linha de ação para desenvolver uma metodologia aprimorada, para propor uma solução que garanta um certo grau de inovação por meio do recurso a novas tecnologias de produção.

As tecnologias de fabrico aditivo também são exploradas nesta seção, focadas no fabrico aditivo de metal em cama de pó e apresentando a relevância da sua incorporação no trabalho atual. Para uma melhor compreensão das referidas tecnologias, proporcionando avanços recentes em outras indústrias de ferramentas e o seu sucesso, este estudo fornecerá os aspetos técnicos para sustentar a relevância da incorporação de tecnologias aditivas ao projeto das ferramentas para conformação de vidro.

2.1. Processo produtivo do vidro de embalagem

2.1.1. Composição

A composição consiste em dosear e misturar as matérias-primas para obter diferentes tipos de vidro, com várias cores e propriedades.

Sílica na forma de areia e embalagens usadas em fim de vida (caco) são as duas principais matérias-primas na fabricação de vidro. Na Tabela 1 é apresentado um breve resumo das classes, tipos, funções e qualidades principais das matérias-primas usadas no fabrico de vidro sódico-cálcico.

Tabela 1 - Principais constituintes do vidro soda-cal. Origem: BA Glass.

Matéria-prima	Material	Função	Quantidade
Reciclado de embalagens	Vidro reciclado	Redução de custos	até 75%
Vitrificante	Silica (SiO ₂)	Constituinte base do vidro	até 74%
Fusor	Carbonato de sódio(Na ₂ CO ₃), Óxido de sódio (Na ₂ O), Óxido de potássio (K ₂ O)	Baixar ponto de fusão	12~13%
Estabilizador	Óxido de cálcio (CaO), Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃), Carbeto de cálcio (CaC ₂), Óxido de magnésio (MgO), Óxido de zinco (ZnO)	Estabilizar massa do vidro	12 ~ 13%
Afinador	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃), Cromita, Sulfato de sódio (Na ₂ SO ₄)	Controlo de cor e opacidade	-

A reciclagem de embalagens em final de vida útil é muito atraente para esta indústria e, dadas as propriedades do vidro, pode ser reintroduzida na produção e reduzir custos com outras matérias-primas. A reutilização de embalagens vazias também pode originar-se internamente, reintroduzindo diretamente o produto rejeitado, pelo controlo de qualidade, como matéria-prima.

2.1.2. Moldação

Ao longo do seu percurso no forno o vidro arrefece desde a temperatura máxima da ordem dos 1600°C até temperaturas da ordem dos 1300-1200°C na zona de trabalho [3], [4].

O vidro viscoelástico cai do forno a cerca de 1200°C e, depois de cortado por tesouras, é direcionado através de calhas para as várias seções das máquinas IS (Individual Section). As máquinas IS são muito importantes para esse setor, pois a produção é muito automatizada o que permite as elevadas cadências e os baixos custos.

Normalmente, as máquinas IS possuem de 6,8,10,12 a 16 ou mais seções individuais, e dado o alto desgaste dos moldes, estes precisam de ser trocados e reparados com frequência para garantir a qualidade esperada para a produção. As máquinas IS, como é exemplo a Figura 1, permitem a substituição das ferramentas sem grandes problemas já que uma secção pode ser parada individualmente sem afetar a produção das outras secções.



Figura 1 - Máquina IS de 8 secções.

De acordo com o produto final, existem diferentes processos de moldação de vidro, que condicionam a qualidade, a distribuição em espessura do vidro e o peso da embalagem final.

Durante o processo de moldação, a temperatura do vidro diminui aumentando a viscosidade. Variáveis como o arrefecimento do molde, tempo de molde de iniciar, temperatura da gota, etc., devem ser controladas para conformar o produto no momento certo. A massa de vidro deve ser fluída o suficiente para ser facilmente conformada; se o vidro arrefecer demasiado, o aumento da viscosidade impedirá a distribuição uniforme e correta do vidro no molde, provocando problemas de geometria no produto final. No final do processo, o produto de vidro sai da máquina IS a cerca de 650°C para o tapete que geralmente redireciona as embalagens a fornos de recozimento ou têmpera para aliviar tensões residuais e melhorar a qualidade do produto.

O processo de conformação começa com um molde de iniciar, onde as gotas recebem uma pré-forma do produto a moldar e que depois é transferido para o molde de acabar para conformar a geometria final. A variante do processo de conformação é dada em função das tecnologias associadas ao molde de iniciar, sendo que o molde de acabar realiza a conformação por sopro. Na Tabela 2 são identificados os principais processos para fabrico de vidro de embalagem.

Tabela 2 - Principais processos para fabrico de vidro de embalagem.

Processo	Descrição
SS	Soprado-Soprado
PS	Prensado-Soprado
NNPB	Prensado-Soprado de gargalo estreito

2.1.3. Processos de Conformação

Componentes dos moldes

Nesta secção são apresentados os vários componentes dos moldes de conformação de vidro.

As Figura 2 e Figura 3 ilustram os vários componentes dos moldes de conformação de iniciar e de acabar, respetivamente.

O componente denominado de marisa é responsável pela conformação do gargalo, este é formado no molde de iniciar já com a sua forma final. O anel guia, inserido dentro da marisa durante o processo, é utilizado para centrar o punção ou a cabeça de sopro no molde de iniciar, e no molde de acabar para centrar a cabeça de sopro na conformação final. O párison é a denominação da pré-forma obtida no molde de iniciar. O tampão é responsável pela conformação do fundo do párison no molde de iniciar (neste caso, a

parte superior do párison antes deste ser invertido), a chapa da base vai conformar o fundo da embalagem no molde de acabar.



Figura 2 - Componentes do molde de iniciar de um frasco de compota.

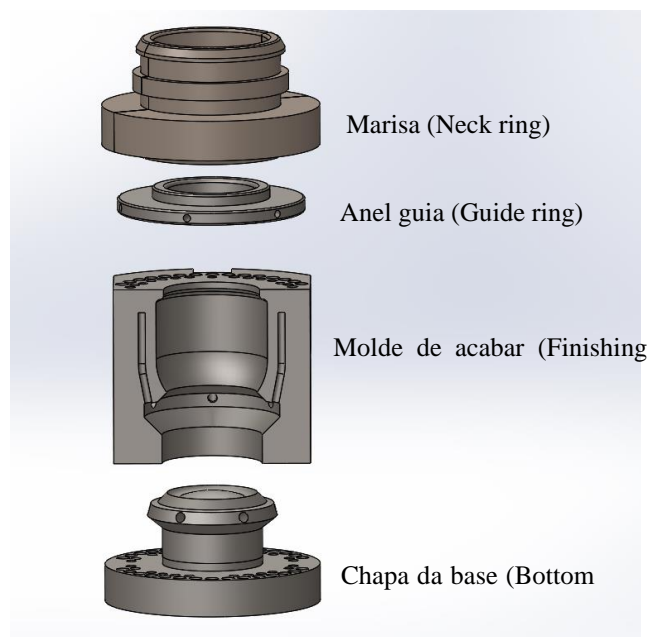


Figura 3 - Componentes do molde de acabar de um frasco de compota.

Soprado-Soprado

Como mencionado anteriormente a principal variação nos diferentes processos reside no processo para conformar o párison. Esta pré-forma da embalagem tem a marisa formada no mesmo momento. Este processo de moldação inicial é normalmente aplicado a embalagens de gargalo estreito. Os diâmetros do gargalo variam de 3 mm a cerca de 38 mm. A ação neste processo é pneumática e não há intervenção mecânica para a conformação. O párison é então invertido, transferido para o molde final e a embalagem é obtida, pronta para ser tratada termicamente em processos posteriores. A parte esquerda da Figura 4 mostra uma imagem do párison antes do molde de acabar fechar, e a parte direita da Figura 4 mostra a embalagem à saída da IS. A Figura 5 apresenta o esquema do processo soprado-soprado.

A Figura 5 ilustra as principais fases do processo no esquema. No molde de iniciar à esquerda é realizada a formação do párison por sopro. No primeiro momento representado, é dada a queda da gota de vidro para dentro do molde de iniciar, de seguida é colocado o tampão, é depois realizado o sopro conformando a pré-forma. Depois do molde de iniciar abrir, ao centro do esquema está representado o braço que realiza a inversão do párison para o molde de acabar. No primeiro momento é representado o fecho do molde de acabar, de seguida é realizado o sopro, no terceiro momento é efetuado o arrefecimento do vidro até atingir uma temperatura estável para a geometria. No último momento está representada a abertura do molde de acabar e as pinças que retiram a



Figura 4 - Imagem do processo soprado-soprado. À esquerda: párison soprado já invertido aguardando o fecho do molde final. À direita: embalagem conformada pelo molde final.

embalagem para o tapete de transporte. A Figura 6 apresenta exemplos de embalagem obtidas por este processo.

A geometria da garrafa de vinho Mateus Rosé é considerada complexa pelos fabricantes. O facto da sua geometria de cantil não ser de revolução, leva a que os canais de arrefecimento tradicionais se encontrem a distâncias irregulares da superfície moldante, dificultando o controlo de temperaturas no molde.

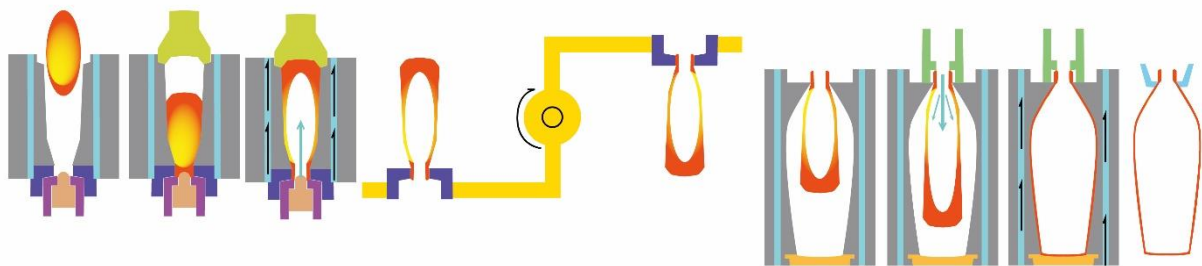


Figura 5 - Esquemática do processo soprado-soprado.

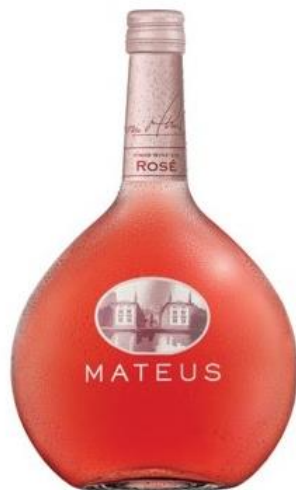


Figura 6 - Exemplos de embalagens obtidas pelo processo SS (soprado-soprado). Garrafa de Mateus Rosé 375ml e frasco de perfume 75ml.

Prensado-Soprado

Ao contrário do soprado-soprado, neste processo o parison é formado por ação mecânica, é pressionado um punção sobre a massa de vidro viscoelástica para criar a pré-forma. Esse processo também é conhecido como prensado-soprado de boca larga, pois os

Um exemplo de produto conformado pelo processo prensado-soprado é exibido na Figura 8 e o esquema do processo é apresentado na Figura 9.



Figura 8 - Exemplo de embalagem produzida por prensado-soprado.

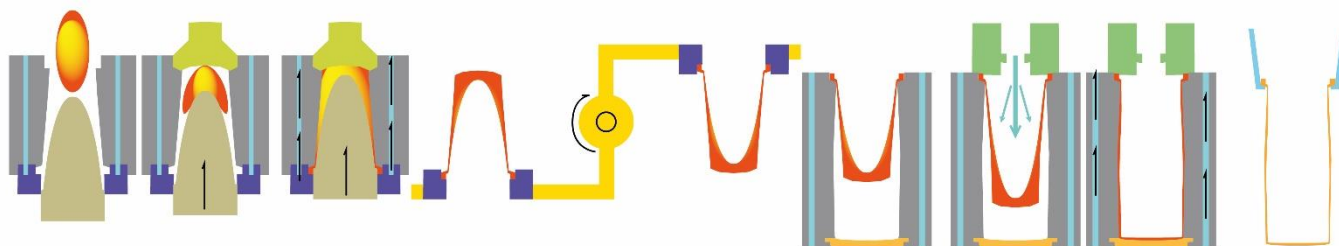


Figura 9 - Esquema do processo prensado-soprado.

Prensado-Soprado de boca estreita

Este processo é muito parecido com a moldação de embalagem de boca larga (prensado-soprado) referido anteriormente. Este é um processo derivado do prensado-soprado de boca larga, desenvolvido na Alemanha e fortemente introduzido nos EUA nos anos 70, pois permitiu fabricar embalagens de alta qualidade e de menor volume para bebidas. Foi considerado revolucionário quando os fabricantes conseguiram melhorar a produtividade, reduzindo variações de massa e espessura nas produções. Permitiu uma redução de massa de vidro na ordem de 30% sem diminuir as propriedades mecânicas da embalagem. O punção é identificado como um elemento-chave, pois é bem-sucedido em distribuir uniformemente o vidro contra o molde e remover efetivamente a energia térmica do párison, permitindo maior cadência, reduzindo empenos e o escorrimento quando é dada a inversão do molde de iniciar para o molde final, gerando um melhor controle da reprodutibilidade do processo [8], [9]. A Figura 10 mostra um exemplo de produto obtido

pelo processo prensado-soprado de boca estreita e a Figura 11 mostra o esquema do processo.



Figura 10 - Exemplo de embalagem produzida por NNPB e o seu molde de acabar.

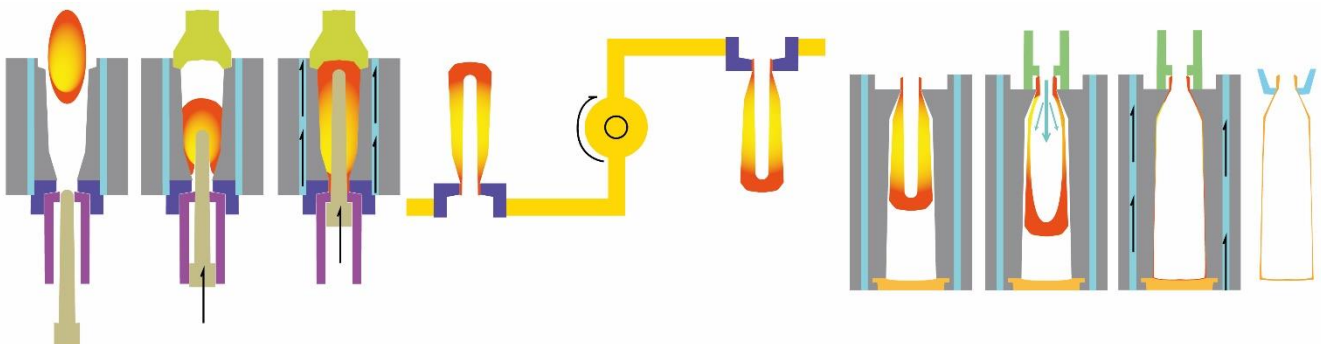


Figura 11 - Esquema do processo NNPB.

Ventilação do molde

Existem algumas abordagens diferentes na ventilação dos moldes de vidro. Geralmente, a ventilação é definida por especificações técnicas de tipos de garrafas, geometrias, processos de formação ou até mesmo dos equipamentos. Como o tempo de contato é diferente para diferentes processos e geometrias, ter algumas regiões do molde mais frias do que outras apresenta uma vantagem no controle do processo. Dadas as altas temperaturas da gota de vidro, o molde aumenta a temperatura e o seu arrefecimento é

fulcral para manter o molde dentro de um intervalo de temperaturas específica a fim de manter a reprodutibilidade do processo e a qualidade da embalagem.

Por exemplo, para a mesma embalagem, no processo soprado-soprado, no primeiro passo o vidro entra em contato primeiramente no corpo do molde, o contato com o tampão é dado por último, portanto, uma ventilação com orientação de cima para baixo ajudará a remover o calor de forma mais uniforme, a extremidade do fundo precisa de remover mais calor pois o tempo de contato é menor. Para o processo prensado-soprado de boca estreita, o fundo tem contato primeiro, pois a marisa é formada por último, de modo que uma refrigeração de baixo para cima é mais vantajosa [10].

A ventilação do molde possui 2 variações principais: radial e axial. O módulo de ventilação radial é apresentado na Figura 12, retirado do catálogo da Heye International GmbH [11]. Para a ventilação axial, a solução é conhecida como Vertiflow, pois a passagem do ar é forçada através de furos longitudinais, conforme representado na Figura 13, este sistema apresentado permite o arrefecimento contínuo dos moldes [12]. Os processos rápidos de conformação de embalagem em vidro estão geralmente associados à tecnologia Vertiflow, que se demonstra a mais eficiente no arrefecimento dos moldes para conformação de vidro e comparação com o arrefecimento radial.

A Heye International já está a atualizar as suas máquinas para a indústria 4.0 com aquisição de dados em tempo real e gestão de controlo de processo, conforme ilustrado

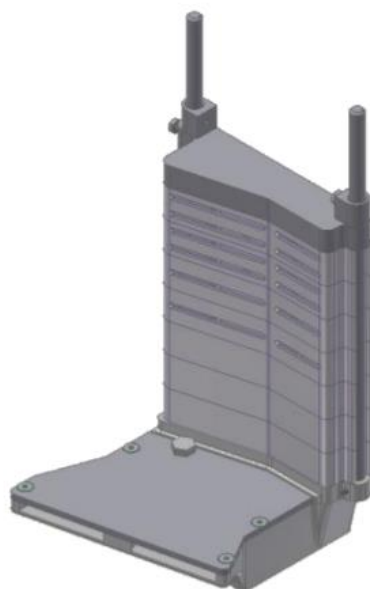


Figura 12 - Módulo de arrefecimento radial para máquinas IS da Heye

na Figura 14. Essas soluções permitem um melhor controle do processo e um rápido tempo de reação para as variáveis apresentadas, maximizando os ganhos nos tempos de produção, a eficiência energética e tirar maior partido do desempenho das ferramentas [9].

A Heye International GmbH também tem desenvolvido soluções para refrigerar o molde de forma contínua durante todo o ciclo, a fim de maximizar a estabilidade, a qualidade e a maior produtividade. Esta é uma abordagem inovadora em ferramentas de vidro, pois a ventilação do molde pode ser dada após a abertura do molde e antes da transferência da próxima gota / párison, limitando a remoção de calor da ferramenta a um tempo menor. Em outros sistemas o arrefecimento é dado apenas enquanto o molde está fechado. A solução que apresenta maior rentabilidade e eficiência é, como mencionado, um arrefecimento contínuo [14].

O desenvolvimento de uma solução otimizada de ferramentas é o objeto deste trabalho e, para melhor contextualizar os incrementos pretendidos, a próxima seção descreve os



Figura 13 - Solução para ventilação contínua dos moldes pela Heye International GmbH [12].

recursos obtidos de outras atividades de pesquisa e desenvolvimento nas ferramentas de injeção de polímeros e as tecnologias de ponta que permitem o fabrico das mesmas.



Figura 14 - Otimização de processo com aquisição de dados em tempo real em sistemas da Heye International GmbH.

De acordo com informação recolhida presencialmente, o tempo de moldação do párisson é cerca de 1,3 segundos incluindo 0,5 segundos de tempo de punção, já no molde final (apresentado na Figura 16), o processo demora cerca de 2,3 segundos. De forma a melhorar a cadência para este produto, as otimizações devem ser realizadas no molde final, dado que é este passo o mais demorado de todo o processo de conformação. O mesmo se verifica para outros produtos e outros processos pois é necessário remover maior energia calorífica no molde final de forma a estabilizar a geometria do vidro. Contudo o frasco de compota é uma embalagem de geometria standard que é produzida há várias décadas. Para melhor compreender o impacto do fabrico aditivo, um recipiente com maior complexidade geométrica do que o frasco de compota deve ser analisado. A Figura 15 apresenta uma maior variedade de formas de embalagem de maior complexidade inclusive o cantil de Mateus Rosé. O cantil é considerado uma geometria complexa e a elevada comercialização internacional deste produto gera a necessidade de maiores volumes de produção. A Figura 17 representa, lado a lado, o conceito de ventilação axial Vertiflow e o conceito de canais conformáveis a desenvolver no corrente trabalho que será denominado Conformalflow, seguindo a mesma lógica da nomenclatura de Vertiflow (Vertical + flow).

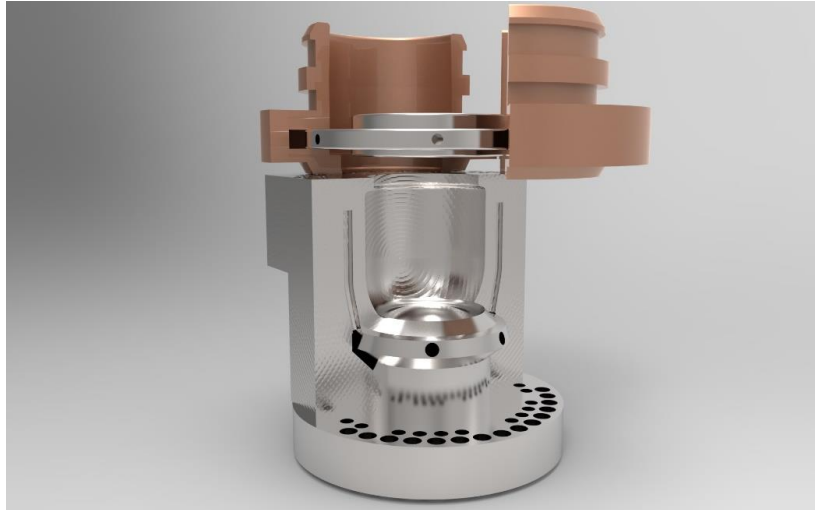


Figura 16 - Molde de acabar para frasco de compota.



Figura 15 - Exemplos de geometrias de garrafas alternativas de maior complexidade de forma.

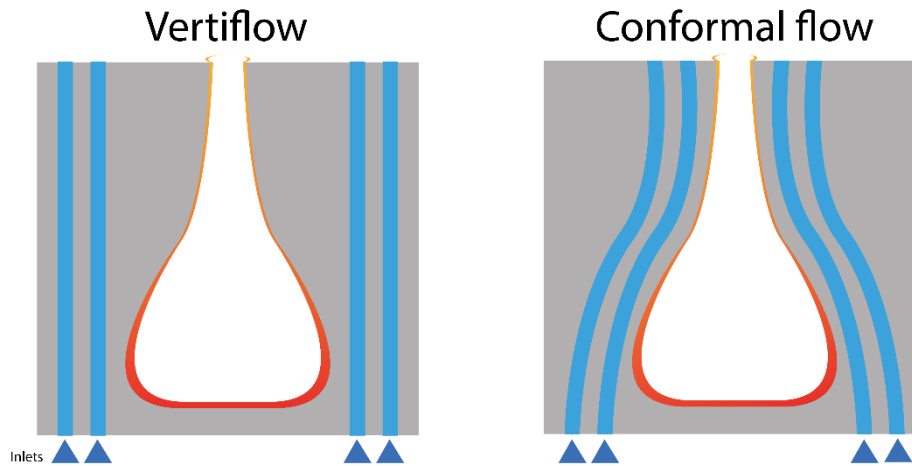


Figura 17 - Representação esquemática do conceito de ventilação do molde final para produção do cantil. Esq: Vertiflow. Dir: Conceito de canais conformáveis Conformalflow.

2.2. Soluções inovadoras no projeto de ferramentas por fabrico aditivo

O FA apresenta uma liberdade geométrica quase ilimitada em comparação com os métodos tradicionais de fabrico. A indústria de ferramentas para injeção de polímeros já recorre aos benefícios do FA, o fabrico de postigos para zonas problemáticas dos moldes com canais conformais permite um melhor controlo do processo, reduzindo tempos de ciclo, deformações e outros defeitos relacionados com arrefecimento não uniforme em peças plásticas. A Figura 18 apresenta lado a lado a solução de canais tradicionais e a solução de canais conformáveis. Para a moldação de vidro, é necessário arrefecer determinadas zonas do molde para manter a variação de temperatura da superfície moldante num intervalo específico para o próximo ciclo e as técnicas subtrativas tradicionais não têm flexibilidade para personalizar estes aspetos nomeadamente para maior complexidade geométrica. Além da necessidade de uma melhor uniformização de temperatura, reduzir a temperatura do vidro de forma mais eficiente é também vantajoso para a redução de tempo de ciclo.

O FA não apenas permite um alto grau de liberdade geométrica, mas também um alto impacto na otimização da topologia, minimizando a quantidade de material necessário em massa e em volume, obtendo uma peça com redução de peso sem comprometer a integridade estrutural [15]. O CAE (Computer Assisted Engineering) tem um papel importante no processo de otimização de ferramentas e, para obter os melhores resultados,

várias geometrias e simulações devem ser testadas e comparadas, auxiliando na tomada de decisões para o projeto final.

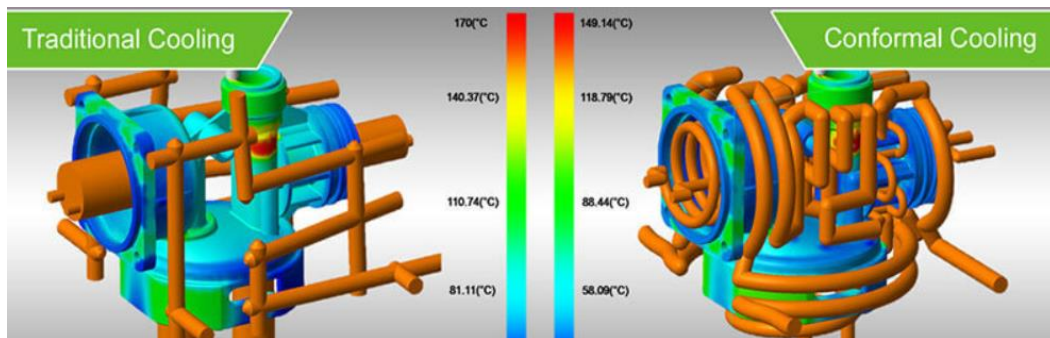


Figura 18 - Comparação entre refrigeração tradicional e uma solução com canais conformáveis para a mesma peça. (Imagem retirada de <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/>)

O processo de FA que permite o fabrico desta tipologia de moldes com soluções conformáveis é na sua generalidade o SLM (selective laser melting – fusão seletiva a laser). Como a maioria dos processos aditivos este é também realizado camada a camada, neste caso recorrendo à energia térmica do laser para fazer a fusão do pó metálico na área de secção da peça, repetindo este passo com incrementos em altura, até a peça se encontrar finalizada. A Figura 19 ilustra o processo SLM e a Figura 20 demonstra o varrimento laser dado à camada durante o processo.

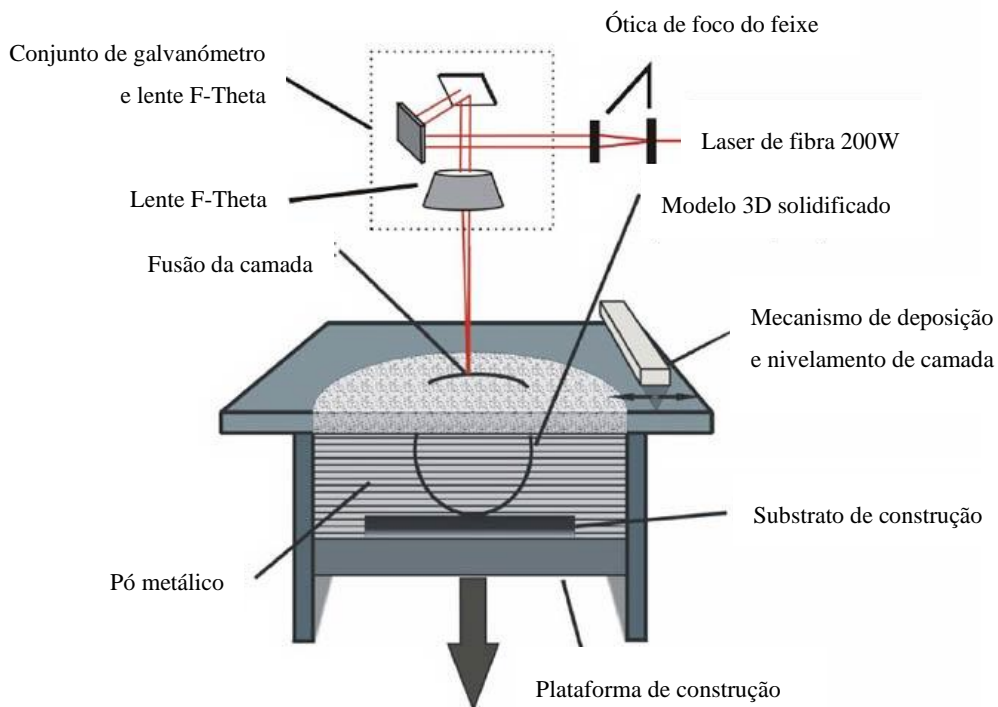


Figura 19 - Esquema do processo SLM. Adaptado do trabalho de Ali Alagha (DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109654)



Figura 20 - Varrimento laser na camada durante o processo SLM.

Geometrias de canais

Ao nível de geometrias para canais conformáveis existem inúmeras abordagens. O estudo de Feng et al, reúne num artigo de revisão um elevado número de casos de estudo e abordagens para soluções de canais conformáveis, identificando diferentes tipologias e vantagens [1]. No geral, as abordagens de canais conformáveis apresentam significativamente melhor desempenho do que as soluções tradicionais. Existe espaço nesta área do arrefecimento conformável e fabrico aditivo para abordagens inventivas, como é o caso de estudo de Berger et al, que desenhou canais com uma abordagem biomimética para aumentar a eficiência do molde, como demonstra a Figura 21, com o inserto com arrefecimento conformável vascularizado [16]. Algumas das soluções presentes na revisão de Feng et al são bastante interessantes e inovadoras para a indústria de moldes para injeção de termoplásticos, porém, visto que para os moldes para vidro não existe tanto desenvolvimento neste aspeto, as geometrias a propor devem ser mais simples, ao encontro de canais conformáveis de geometrias menos complexas e para termo de comparação com o tradicional, deverá ser mantida a área de secção do canal para todas as geometrias.



Figura 21 - Canais conformáveis vascularizados (biomimética). Do estudo de Berger et all [16].

Outro estudo revisto no artigo de Feng et all, foi o da inclusão de estruturas internas ao canal.

O arrefecimento dos moldes de conformação de vidro é dado pela ventilação dos canais para esse efeito, para explorar o potencial das tecnologias de FA é estudada a possibilidade de inclusão de geometrias de dissipação como alhetas para potenciar o arrefecimento. Com vista ao aumento da área superficial do canal é possível aplicar uma geometria semelhante às existentes que encontram aplicação por exemplo em componentes eletrónicos, permutadores de calor, radiadores, etc, ou mesmo novas alternativas inventivas.

O artigo de Freitas et all estudou diferentes geometrias de secção de canais (circular e quadrado) e várias alternativas de geometrias internas. O autor aponta como benéfico a aplicação de alhetas dentro dos canais, crescendo da direção da fonte de calor. A Figura 22 demonstra o aumento significativo do fluxo de calor para a configuração com alhetas [17]. Este estudo serve de base para o desenho dos canais a desenvolver para fabrico e testes. As condições de teste para o presente trabalho são mais extremas que as consideradas pelo autor para o estudo referido. As simulações foram realizadas para um paralelepípedo, sem que estes canais sejam conformáveis nem com objetivo de reduzir a

temperatura de uma superfície moldante, mas será considerada a questão da presença de alhetas direcionais numa das alternativas de canal para comparação com as outras geometrias.

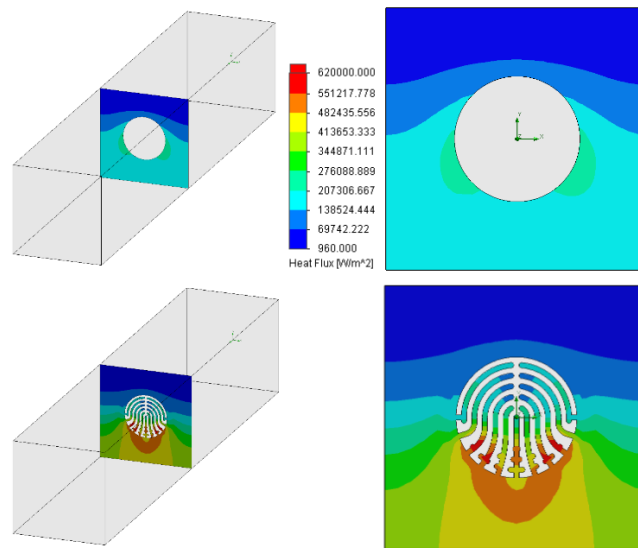


Figura 22 - Canal circular e canal circular com design de alhetas direcionais. Do estudo de Freitas et all [17].

O estudo de Roy et all, comparou o desempenho de alhetas retangulares e triangulares, e concluiu que a geometria de alhetas triangulares é mais efetiva na dissipação de calor do que a sua alternativa de alhetas retangulares [18]. Ele aponta que as alhetas triangulares necessitam de menos volume de material para conseguir um desempenho igual ao das alhetas retangulares. A Figura 23 ilustra a geometria de alheta triangular.

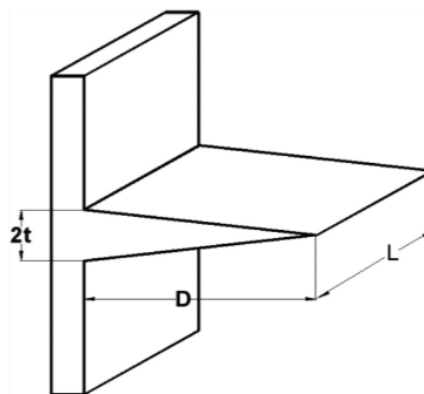


Figura 23 - Geometria da alheta triangular. Retirado do estudo de Roy et all [18].

O estudo de Roy et all vai ser considerado para o desenho das alhetas internas de canais conformáveis no presente trabalho. Com o objetivo de redução de material, a geometria triangular servirá de base para um dos conceitos conformáveis. Como referido ao longo do trabalho sobre as vantagens do FA de metais em cama de pós, um dos pontos principais

é a possibilidade de redução de massa e volume pela presença de estruturas auto suportáveis em treliça para substituição de maciços de material.

Estruturas

Ao nível de estruturas em treliça para substituir maciços em peças, existem inúmeras alternativas para diferentes aplicações. Pavel Hanzl et all estudou propriedades mecânicas das estruturas apresentadas na Figura 24. Concluiu que as estruturas apresentam diferentes propriedades consoante o eixo a que a carga é aplicada [19].

Visto que ao contrário da moldação para injeção de termoplásticos, onde as ferramentas moldantes estão sujeitas a elevadas forças e pressões, os moldes de vidro são menos solicitados nesse aspeto, sendo o sopro dado a pressões na ordem dos 2 a 4 bar, portanto, no presente trabalho o tipo de estrutura a aplicar pretende apenas a redução de material. Serão aplicadas outras estruturas identificadas como mais resistentes para termo de comparação com a aplicação de estruturas leves de propriedades mecânicas mais baixas.

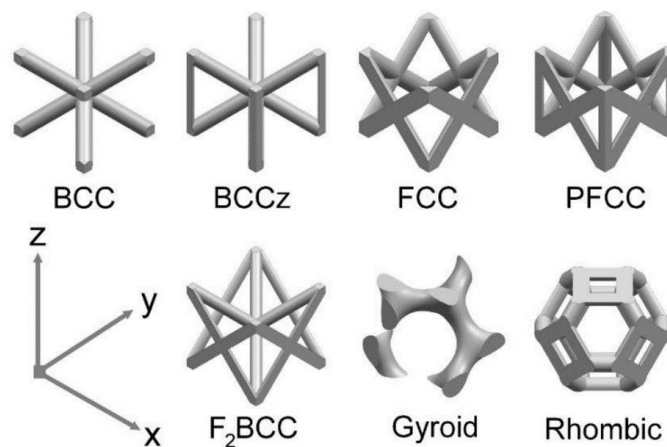


Figura 24 - Exemplos de estruturas em treliça auto suportáveis.
Retirado do estudo de Pavel Hanzl et all [19].

3. Soluções Propostas e procedimento experimental

3.1. Molde caso de estudo – Desenho e simulações preliminares

A Vidrimolde forneceu desenhos técnicos e especificações técnicas do caso de estudo, o cantil de Mateus Rosé. Sobre este foram desenhadas e conceptualizadas várias geometrias de canal conformável a uma distância contínua da superfície moldante perante os requisitos apresentados pelo fabricante.

O caso de estudo do cantil é de geometria complexa visto que não é uma peça de revolução e apresenta curvas mais pronunciadas que outras geometrias standard.

Para o caso de estudo do cantil, são apenas alvo de alteração as geometrias dos canais de arrefecimento dos moldes. As zonas estruturais do molde que não apresentam impacto na ventilação do mesmo são alvo de otimização topológica com geração de estruturas em treliça que garantam o desempenho estrutural esperado e que reduzam o tempo de produção aditiva e o consumo de material.

Foi analisado o desenho técnico do molde tradicional (Figura 25), e com este foi desenvolvido um CAD para visualização 3D do molde e identificadas algumas restrições e peculiaridades desta tipologia de molde. As furações do molde tradicional encontram-se a cerca de 10mm no ponto de maior proximidade com a superfície moldante, porém podem encontrar-se a cerca de 45 mm de distância noutras zonas, e a distâncias intermédias de 20 a 30 mm noutras zonas da superfície de vidro da embalagem, dado que os furos são feitos à mesma distância do eixo central do molde/embalagem.

O desenvolvimento do caso de estudo prevê o desenho de canais conformáveis de arrefecimento que devem manter uma distância constante de 10mm à superfície moldante de modo a manter uma referência em relação ao molde tradicional. O diâmetro de canal de arrefecimento (8mm) é mantido para fixar uma variável e compreender melhor o impacto do conceito de canais conformáveis.

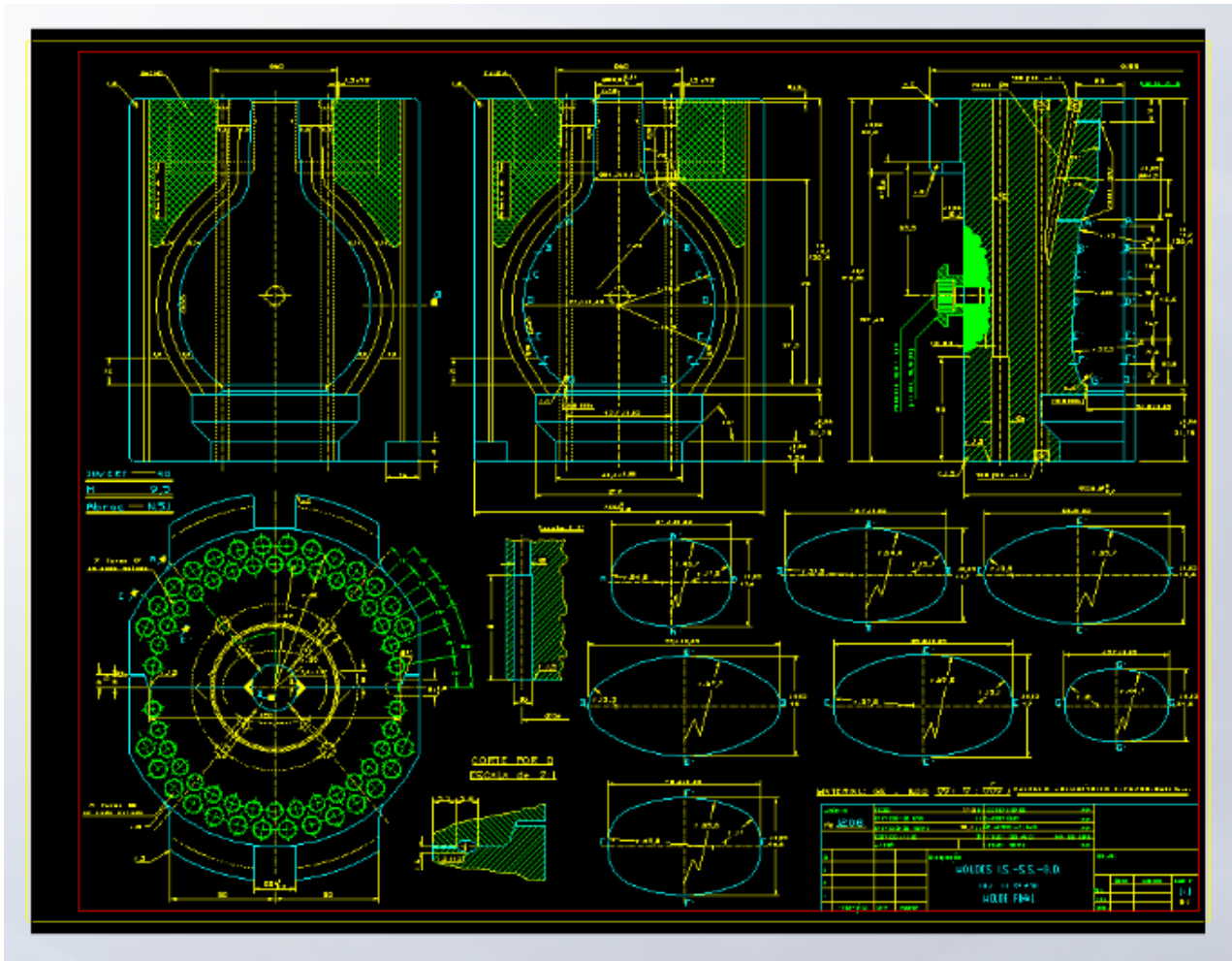


Figura 25 - Desenho técnico do molde de acabar do cantil de Mateus Rosé 33cl.

Dado o desenvolvimento de alternativas para o caso de estudo, os moldes com canais conformáveis são testados por simulação CFD para estudar o fluxo de ar e o impacto das várias geometrias de canal na superfície de contacto com o vidro. O vidro é modelado em CAD, feita uma montagem com o molde e eliminados outros componentes da ferramenta para simplificação, a Figura 26 apresenta o molde Vertiflow e a Figura 28 apresenta o CAD do molde com canais conformáveis de arrefecimento da ferramenta. Para inputs de simulação é dada uma temperatura inicial no vidro, uma pressão de ventilação com

valores fornecidos pelo fabricante de ~ 5025 Pa, propriedades dos materiais de acordo com as especificações e um tempo de simulação que permita apresentar a diferença entre a configuração conformável em comparação com as simulações do Vertiflow tradicional. Desta forma é possível prever o grau de melhoria das alternativas desenvolvidas antes do fabrico destas ferramentas.

De seguida é feita a análise topológica de forma a identificar massas de material passíveis de substituir por estruturas em treliça. Ainda em ambiente CAD é possível identificar a redução de massa do molde.

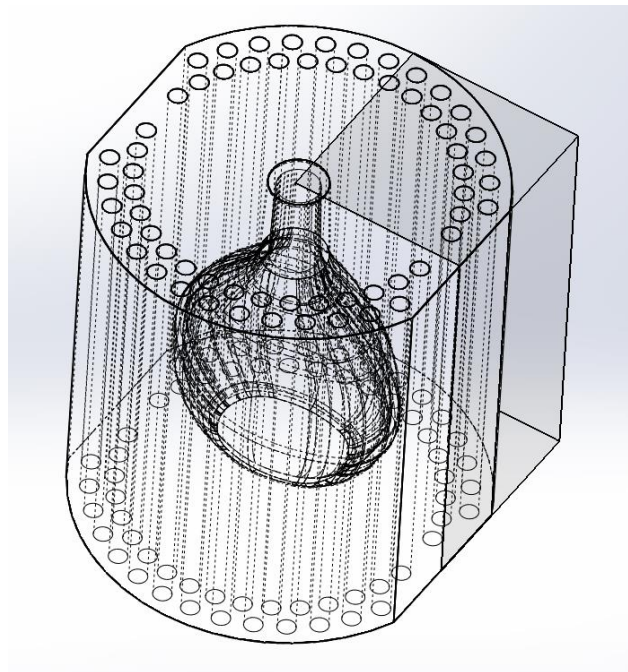


Figura 26 - CAD 3D do molde tradicional simplificado e representação do volume computacional.

As simulações CFD foram realizadas com os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de entrada para simulação com vidro a 800°C.

Temp. inicial do bloco moldante	550°C
Temp. inicial da massa de vidro	800°C
Pressão de ar de entrada (ventilação)	1atm + 5025 Pa = 106 350 Pa
Pressão de ar à saída	1atm = 101 325 Pa
Tempo físico de simulação	10 segundos

As Figura 27 e Figura 29 apresentam os resultados das simulações preliminares do molde tradicional Vertiflow e do molde conceito Conformalflow, respectivamente. Para a realização destas simulações foram usados os parâmetros da Tabela 3.

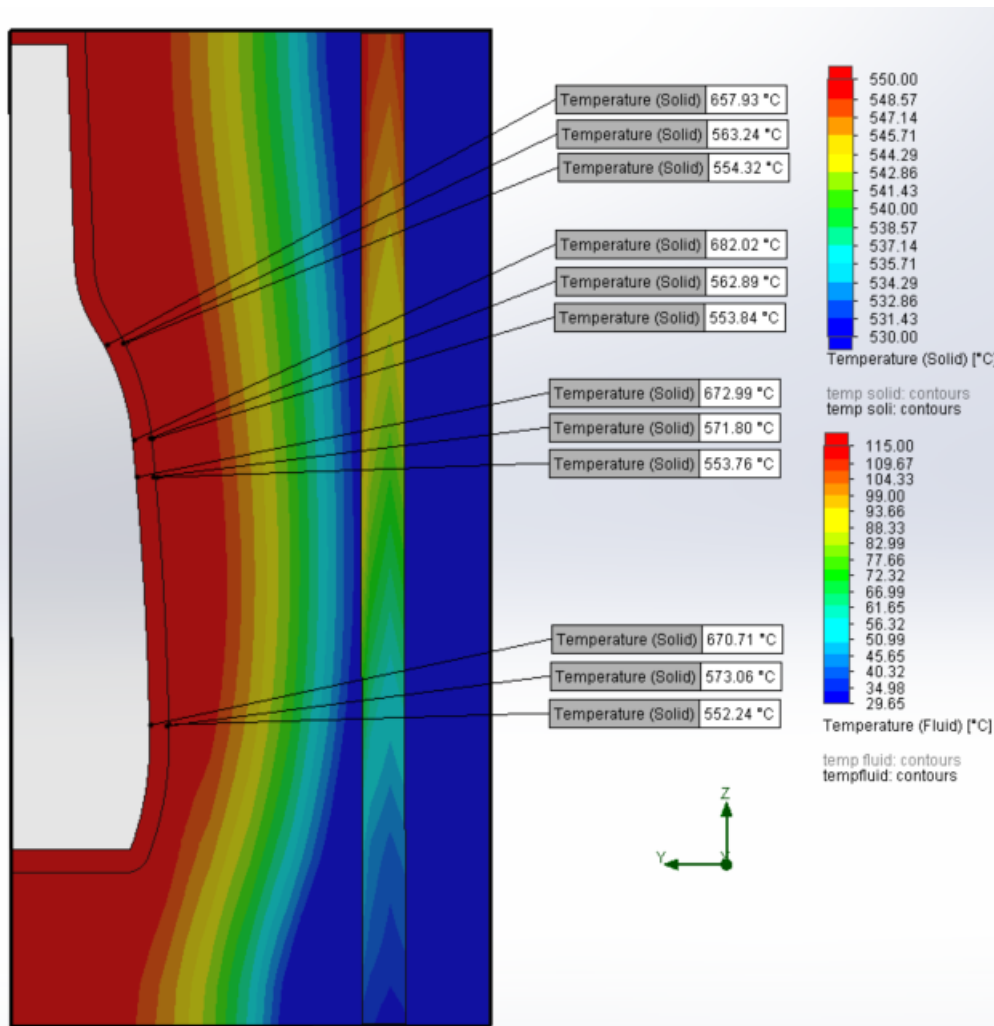


Figura 27 - CFD do molde Vertiflow.

A partir da simulação foi possível identificar que a alternativa com canais conformáveis apresenta temperaturas à superfície mais baixas em comparação com o caso tradicional Vertiflow.

A partir da análise da simulação à alternativa com canais conformáveis da Figura 29, é identificada, na Figura 30, uma região do molde que se prevê que não apresente impacto na ventilação e transferência de calor, sendo esta alvo de otimização topológica, pelo desenvolvimento de estruturas em treliça que mantenham o desempenho mecânico, não

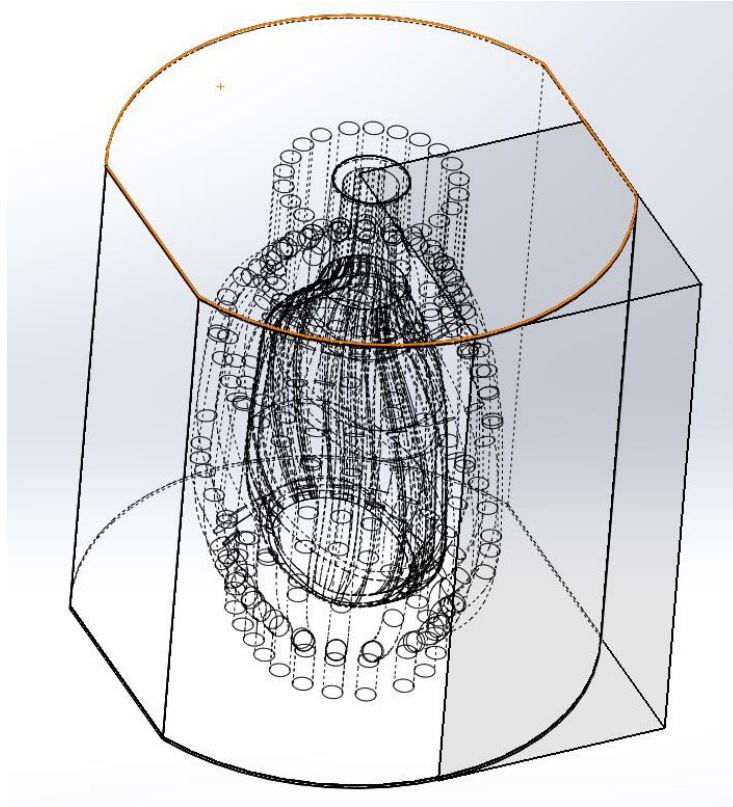


Figura 28 - CAD 3D do molde Conformalflow simplificado e representação do volume computacional.

interfiram no desempenho térmico, porém com o objetivo de reduzir a massa e o volume de matéria-prima (metal em pó) e o tempo de produção do molde através de processo de cama de pó (FA), com efeito num menor custo produtivo da ferramenta.

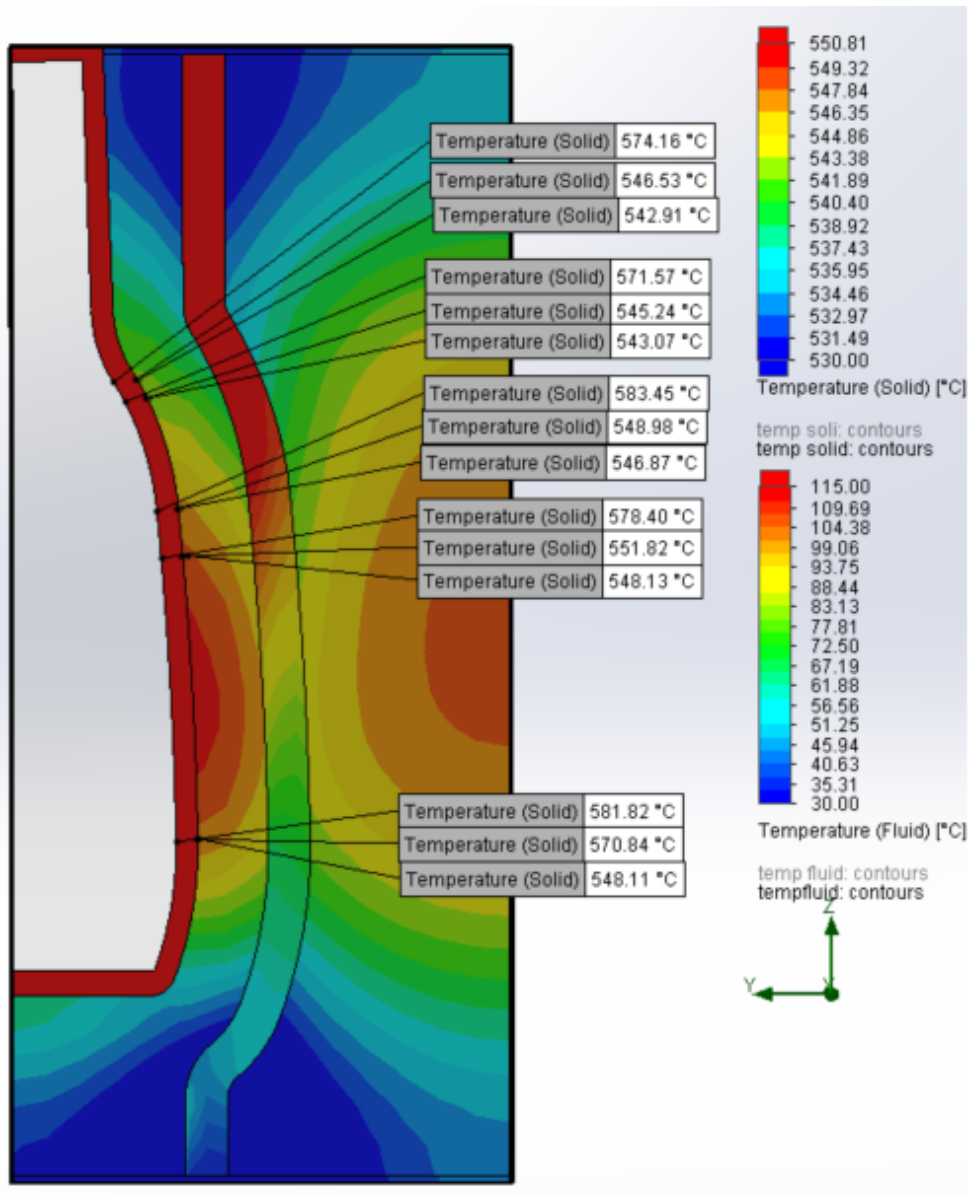


Figura 29 - CFD do molde Conformalflow.

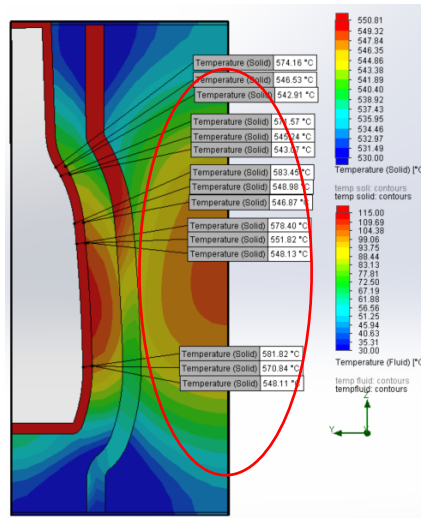


Figura 30 - Identificação da zona para desenvolvimento da estrutura de treliça.

Foram realizadas novas simulações com valores de temperatura do vidro mais elevados da ordem dos 1000°C e com o molde à temperatura de 550°C de acordo com os valores apresentados na literatura [14]. Os dados de entrada para as referidas simulações são apresentados na Tabela 5. Para simplificação do cálculo, a massa do vidro é considerada com temperatura uniforme.

Tabela 4 - Levantamento de valores de temperatura e respetivas referências bibliográficas.

Temp. Molde de acabar (°C)	Temp. vidro (°C)
259.8 [21]	959.9 [21]
500 [20], [22]	975 [20]
480 [23]	1000 [24]
475 [25]	1135; 1153; 1170 [23]
470 a 560 [26]	
500; 520; 540 [27]	

Tabela 5 - Dados de entrada para simulação com vidro a 1000°C.

Temp. inicial do bloco moldante	550°C
Temp. inicial da massa de vidro	1000°C
Pressão de ar de entrada (ventilação)	1atm + 5025 Pa = 106 350 Pa
Pressão de ar à saída	1atm = 101 325 Pa
Tempo físico de simulação	10 segundos

Nas simulações apresentadas nas Figura 31 e Figura 32 é possível notar que as temperaturas do metal junto da superfície moldante encontram-se num intervalo de temperaturas próximo para ambos os casos. No caso tradicional, Figura 31, estes valores situam-se entre os 571°C e os 577°C, para o caso conformável os valores encontram-se entre os 565°C e os 574°C. Os valores mais baixos ocorrem no caso conformável, Figura 32, de forma pouco significativa. Porém, é na temperatura do vidro que se encontra a variação mais significativa entre os dois casos. No caso tradicional, o vidro junto da superfície moldante encontra-se entre 609°C e 793°C, já no caso conformável o vidro encontra-se entre 580°C a 584°C. A partir destes estudos preliminares, prevê-se que o caso conformável seja mais eficiente na remoção de calor ao vidro apresentando também um menor gradiente térmico no mesmo.

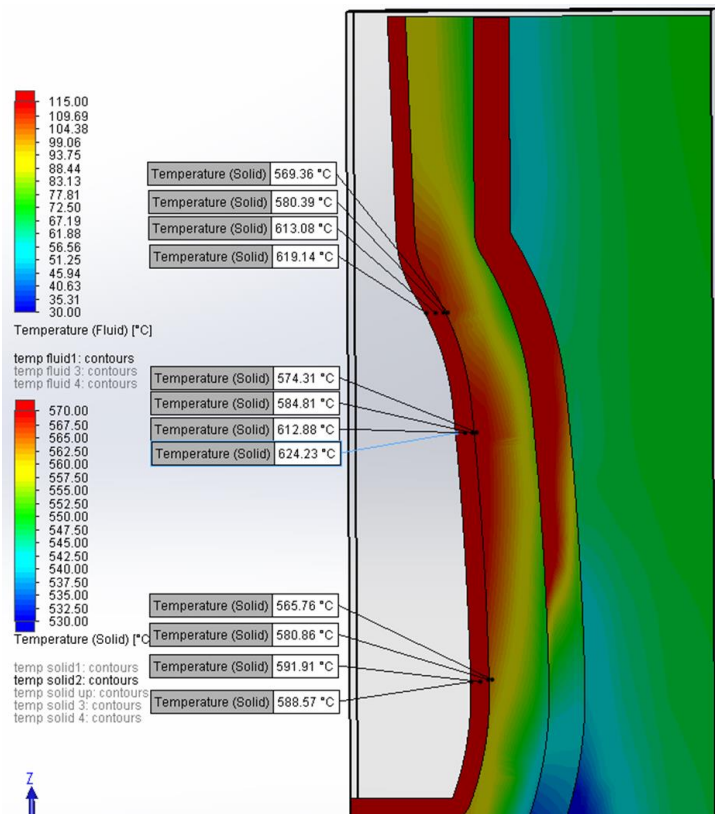


Figura 31 - CFD do molde com canais conformáveis.

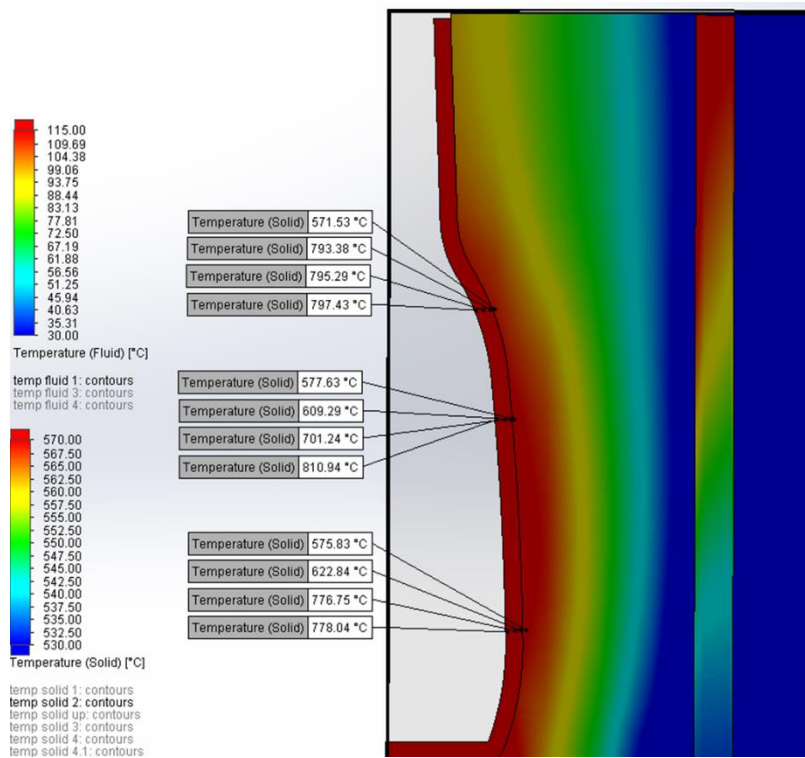


Figura 32 - CFD do molde tradicional Vertiflow.

3.2. Materiais do molde

Para a fabricação dos moldes foi efetuado um levantamento dos materiais admissíveis através da consulta de elementos da literatura especializada sobre o assunto e da informação cedida pela Vidrimolde. Os moldes são compostos por vários elementos, sendo que existem diferentes materiais para esses mesmos elementos. A Tabela 6 apresenta alguns dos materiais recomendados para a indústria de moldes para vidro, segundo o livro Aços para Ferramentas de Pinto Soares [28].

Tabela 6 - Materiais para a indústria de vidro (adaptado de Aços para Ferramentas de Pinto Soares).

Ferramenta					Material nº	DIN 17006	Estado	Dureza de trabalho
1	2	3	4	5				
X				X	1,2082/1,4014/1,4021	X 20 Cr 13	PT	800-950 MPa
X					1,4028	X 35 Cr 13	T+R	50-54 HRc
X	X	X			1,2787/1,4057	X 22 CrNi 17	PT	800-950 MPa
X			X		1,4301	X 5 CrNi 18 9	HP	500-700 Mpa
X			X	X	1,2782/1,4841	X 15 CrNiSi 25 20	HP	550-800 Mpa
		X			1,2343	X 38 CrMoV 5 1	PT	1400-1500 Mpa
		X			1,2344	X 40 CrMoV 5 1	PT	1400-1500 Mpa
		X	X		1,2243	S 6 - 5 - 2	T+R	
		X	X		1,208	X 210 Cr 12	T+R	

Legenda:

1 - Molde base

2 - Estrutura

3 - Punção

4 - cabeças de sopro, sopradores,

5 - Cilindro (rolos)

PT= Tratado (temp+rev)

HP= Tratado (Hipertemperado)

T+R= Temperar e revenir

1 MPa=

N/mm²=9,8

Kg/mm²

Através desta análise foi possível obter uma compilação que permite comparar a disponibilidade de materiais fornecidos em bloco e a disponibilidade de materiais fornecidos em pó adequados ao fabrico aditivo. A Tabela 7 apresenta um pequeno resumo destes materiais e algumas das suas propriedades mais importantes para a indústria de vidro.

Tabela 7 - Materiais adequados à fabricação de moldes para vidro em bulk e materiais em pó para fabrico aditivo. (adaptado de Aços para Ferramentas de Pinto Soares)

Materiais adequados à fabricação de moldes para vidro (Bulk vs material em pó)										
Tipo	Material	Designação equivalente	Composições					Thermal Conductivity (W/m-K)	Dureza (HRc)	Fornecedor
Bulk	1.4014*	AISI 420	0,20 C	0,70 Si	0,30 Mn	13,00 Cr	0 Ni	24	52	Böhler
	1.4021*							24	52	Böhler
	1.2082*							24	52	Böhler
	1.4057*	AISI S80	0,17 C	1,00 Si	1,50 Mn	16,70 Cr	2 Ni	25	47	Böhler
	1.2787*	AISI S80	0,17 C	1,00 Si	1,50 Mn	16,70 Cr	3 Ni	25	47	Böhler
Pó	S420**	AISI 420	0,30 C	1,00 Si	1,0 Mn	13,00 Cr	0 Ni	24	52	Sandvik Osprey
Pó	1.4542***	N700	0,04 C	0,25 Si	0,40 Mn	15,30 Cr	4,50 Ni	34,3	37	Böhler
Pó	1.4108***	W360	0,30 C	0,60 Si	0,40 Mn	15,00 Cr	0 Ni	31,9	50	Böhler

*Soares, Pinto, Aços para ferramentas - Características, Tratamentos, Aplicações, Engebook 2009

** Sandvik Osprey datasheet

*** Böhler datasheet

Apesar dos materiais referidos na bibliografia, a indústria procura outras soluções de elevada condutividade térmica a custo acessível, utilizando também ferro fundido cinzento. O ferro fundido cinzento apresenta-se como um material concorrente aos aços refratários, pois apresenta valores de condutividade térmica mais elevada a um custo bastante acessível, contudo, as suas propriedades mecânicas são bastante inferiores aos aços refratários e a durabilidade dos moldes pode também ser menor.

Sil'vestrovich et al referem a qualidade superior de acabamento dos produtos conformados em molde de aço comparativamente com ferro fundido. O autor refere que a taxa de arrefecimento do vidro não diminui nos moldes de aço, apesar duma menor condutividade térmica deste material em relação ao ferro fundido, notando, porém, ser necessária uma maior ventilação do molde de aço [29].

A solução Vertiflow, só foi introduzida em 1985. Com as soluções atuais das máquinas IS, como as da Heye International, com ventilação contínua e incorporação de canais conformáveis, estima-se que o recurso a aços refratários para moldes de vidro não se apresente como uma desvantagem devido à menor condutividade térmica, mas como uma vantagem em termos produtivos com maior qualidade, durabilidade e desempenho.

3.3. Topologia

Recorrendo ao software Magics 23.01 foi possível fazer uma otimização topológica ao molde de modo a reduzir o seu volume de construção, poupando tempo e material no processo aditivo, que se traduz numa redução dos custos inerentes ao processo SLM como referido ao longo do presente trabalho.

Nesta fase é necessário definir uma espessura da casca (shell) de modo a identificar o volume maciço a transformar em estruturas de treliças e desenhar os furos para remoção do pó não sinterizado no interior da peça. Para os canais conformáveis desenhados, a espessura mínima de casca é de 6mm. Deste modo, evita-se que o software gere estruturas e espaços vazios no maciço entre o canal e a superfície moldante, o que resultaria em isolamento.

A Figura 33 apresenta o CAD do molde tradicional modelado a partir dos desenhos técnicos fornecidos pela Vidrimolde. Pela análise do CAD foi possível retirar os valores da volumetria da peça, permitindo assim calcular a sua massa mediante o material usado para o fabrico tradicional deste molde como apresentado na Tabela 8. Na Tabela 9 são apresentados o volume e a massa do molde com canais de arrefecimento conformáveis, calculados para um dos materiais recomendados por Pinto Soares, o AISI 420 que apresenta maior densidade que o ferro fundido cinzento.

Tabela 8 - Volume, densidade do material e massa do molde Vertiflow.

Volume da peça com Vertiflow	1081.351 cm ³
Densidade do Ferro fundido cinzento	7.2 g/cm ³
Massa da peça	7.786 Kg

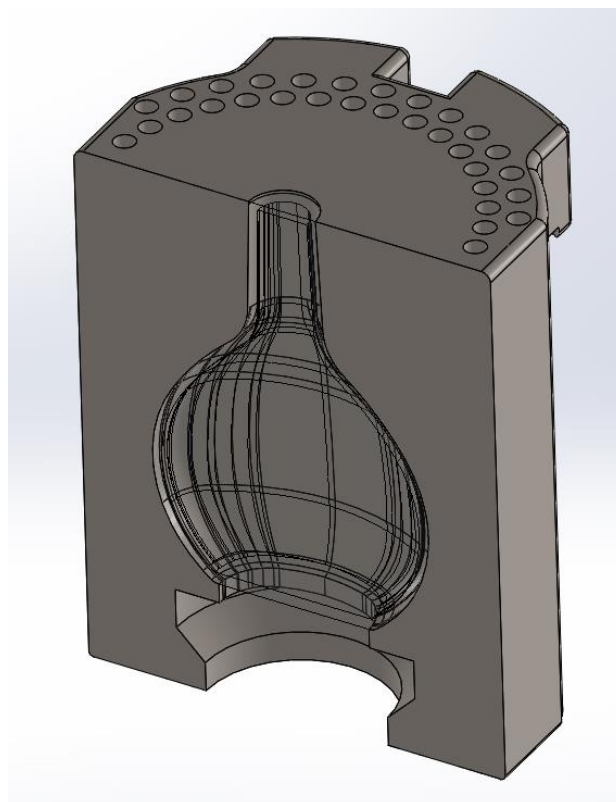


Figura 33 - Molde Vertiflow tradicional.

Relativamente às estruturas em treliça a aplicar, dentro das disponíveis no software utilizado (Magics) foram consideradas as seguintes: estrutura diamante, estrutura rômica

dodecaedro e dodecaedro fino. O artigo de Liang-Yu et all elabora uma compilação de uma grande variedade de estruturas, técnicas de fabrico das mesmas, área de aplicação e principais características [30]. Ao nível de técnicas de fabrico, o SLM é transversal a todas elas pela liberdade geométrica própria do processo, como já referido anteriormente.

A estrutura diamante, aplicada ao molde como demonstrado na Figura 34, é considerada pela sua leveza e encontra a sua aplicação no design de próteses e implantes ósseos. A Tabela 10 apresenta o volume, densidade do material e a massa do molde com canais conformáveis com a aplicação da estrutura diamante.

A estrutura rômica dodecaedro, aplicada ao molde como demonstrado na Figura 35, é conhecida pela sua elevada rigidez e elevada absorção de energia, encontrando aplicação na área médica também para próteses e implantes ósseos. A Tabela 11 apresenta o volume, densidade do material e a massa do molde com canais conformáveis com aplicação da estrutura rômica dodecaedro.

A terceira alternativa é uma variante dodecaedro em treliças finas denominado dode fino aplicada ao molde como apresentado na Figura 36. A Tabela 12 apresenta o volume, densidade do material e a massa do molde com canais conformáveis com a aplicação da estrutura dode fino.

Tabela 9 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis e volume maciço.

Volume inicial da peça com canais conformáveis	1323.5069 cm ³
Densidade AISI 420	7.7 g/cm ³
Massa final da peça sem estruturas	9.529 Kg

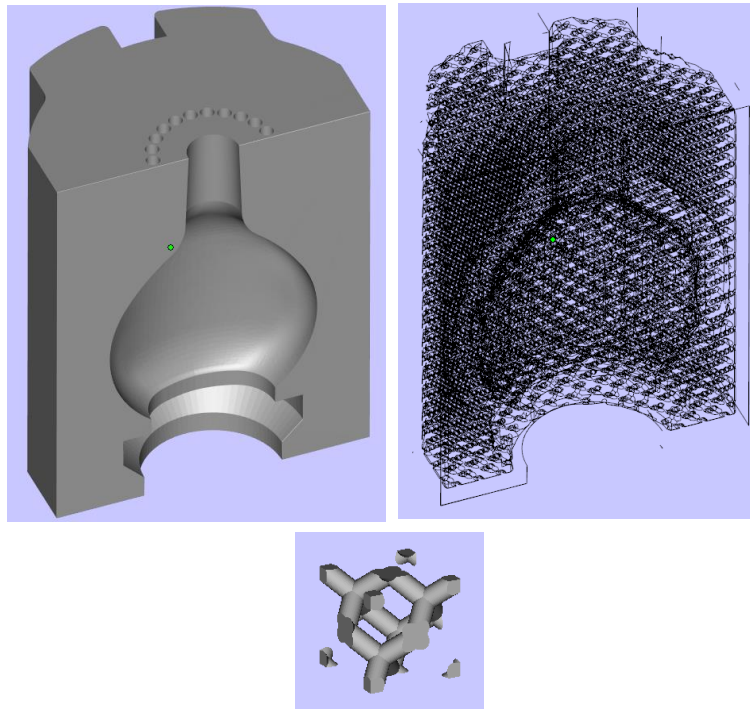


Figura 34 - Molde preliminar com canais conformáveis com volume maciço substituído por estruturas em treliça (Diamante 20%, 10mm).

Tabela 10 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis (estrutura diamante 20% 10mm).

Volume final da peça (estrutura diamante 20% 10mm)	813.5534 cm ³
Densidade AISI 420	7.7 g/cm ³
Massa final da peça	6.264 Kg

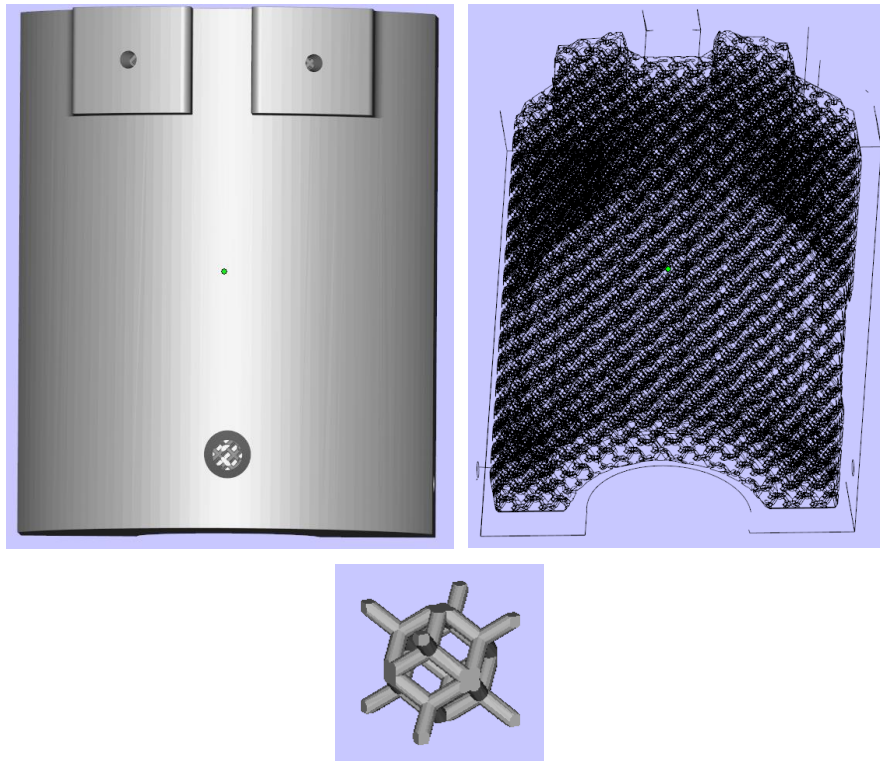


Figura 35 - Molde preliminar conformável com volume maciço substituído por estruturas em treliça (Rômbico dodecaedro 20%, 10mm).

Segundo o autor Hanzl P. et al, a estrutura rômbica dodecaedro apresenta propriedades mecânicas consistentes nos 3 eixos ortogonais sendo esta uma alternativa viável para aplicar na otimização topológica do molde de vidro [20].

Tabela 11 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis (estrutura rômbica dodecaedro 20% 10mm).

Volume final da peça (estrutura rômbica dodecaedro 20% 10mm)	809.1671 cm ³
Densidade AISI 420	7.7 g/cm ³
Massa final da peça	6.230 Kg

É possível minimizar o uso de material através de outras estruturas que, embora menos resistentes, podem gerar um volume significativamente mais baixo de material usado no seu fabrico. Como o processo de sopro de vidro não é dado a altas pressões ou com

grandes esforços mecânicos (comparativamente à injeção de termoplásticos) pode-se, em princípio, recorrer a estruturas menos volumosas.

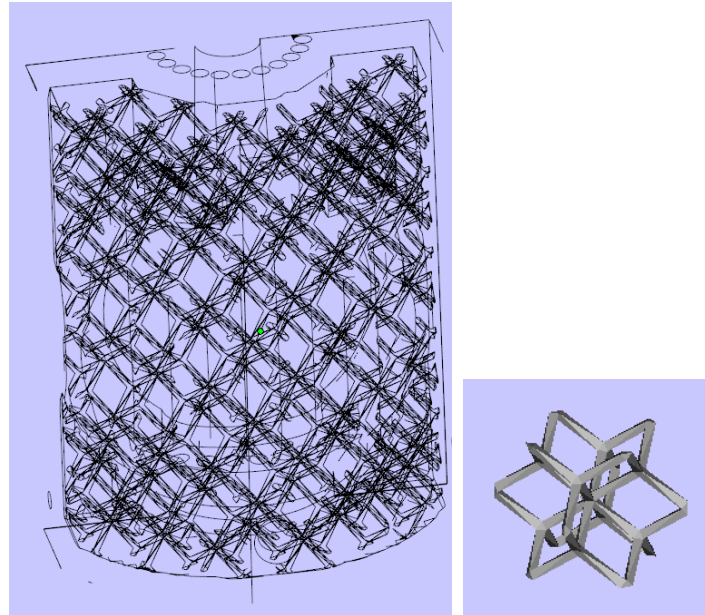


Figura 36 - Molde preliminar conformável com volume maciço substituído por estruturas em treliça (Dode fino, 30mm).

Tabela 12 - Volume, densidade do material e massa do molde com canais conformáveis (estrutura dode fino 30mm).

Volume final da peça (estrutura Dode fino 30mm)	710.2452 cm ³
Densidade AISI 420	7.7 g/cm ³
Massa final da peça	5.468 Kg

Este tipo de estruturas permite não só uma maior velocidade de produção por FA de metais, como também potencia um melhor controlo de processo. Ao obter uma peça com menor área de secção, a densidade de energia e a temperatura da peça são mais facilmente controladas de modo a não produzir os defeitos inerentes a peças com maiores áreas de secção maciças. Defeitos como o efeito *balling*, delaminação e deformações são minimizados com o recurso a estruturas treliça para substituição de volumes maciços problemáticos. O volume maciço substituído por estruturas alveolares em treliça deverá

ser alvo de estudo para garantir que não apresenta impacto na remoção de calor da superfície moldante.

3.4.Problemas encontrados e ações de mitigação

Para prever se as estruturas em treliça afetam a remoção de calor da superfície moldante seria necessário simular o molde treliçado em comparação com o molde maciço, porém, o elevado número de triângulos e complexidade do ficheiro STL gerado pelo software Magics, leva à impossibilidade de simular em CFD estas geometrias. Para tal, será necessário produzir as várias geometrias de moldes, com canais conformáveis e volumes treliçados e com os mesmos canais conformáveis e volumes maciços, e de seguida testar os moldes de modo a conseguir ter uma comparação e concluir se o volume treliçado influencia o arrefecimento do molde.

Estas preocupações acerca da presença de volumes treliçados, e qual a geometria de canal que pode apresentar melhores resultados, leva a uma alteração na estratégia do presente trabalho. Neste momento dos trabalhos e perante as dificuldades expostas, o desenvolvimento passa a ser direcionado à simplificação dos problemas a uma escala mais reduzida, ou seja, diminuir a escala do problema para possibilitar a produção e testes em ambiente laboratorial.

Para evitar produzir o molde desenvolvido, com canais circulares, que envolve uma grande quantidade de material em pó, assim como elevados tempos de produção, sem uma certeza do grau de melhoria da ferramenta, foram desenvolvidos provetes de acordo com as considerações retiradas do desenvolvimento do molde.

Outro dos problemas de difícil resolução é o teste dos próprios moldes desenvolvidos. Não existe atualmente um processo ou um equipamento que permita o teste de moldes para conformação de vidro. Ao contrário dos moldes para injeção de termoplásticos, que podem ser testados em máquinas de injeção disponíveis apenas para testes em condições similares às de produção em série, ensaios em moldes para conformação de vidro deviam ser também testados em condições semelhantes às que encontram em linha de produção. Estas condições atualmente só existem nas próprias fabricas de vidro de embalagem. Em conversações com os fabricantes de moldes e fabricantes de embalagens de vidro, existe uma dificuldade acrescida para o teste de novos moldes. A paragem de uma secção de

produção envolve uma quebra de produção demasiado significativa para o fabricante e a parametrização dessa secção para um molde de embalagem diferente, do que o que está a ser produzido nas restantes secções, pode não ser compatível. Os tempos de moldação seriam diferentes, a massa de vidro da gota seria diferente, o seu redireccionamento pelas calhas teria *timing* diferente, o que colidia com o correto funcionamento das restantes secções assim como da secção utilizada para realizar o teste.

Concluindo, a única forma de testar efetivamente um molde para conformação de vidro seria quando toda a máquina IS estivesse configurada para aquela determinada produção, o que normalmente só acontece quando se faz uma paragem da máquina IS para testar e otimizar os parâmetros de uma nova produção, o que não é o caso do presente trabalho de investigação.

3.5.Provetes

Os provetes desenvolvidos foram desenhados de acordo com considerações exploradas na literatura e pela indústria de moldes para vidro. Os canais Vertiflow do molde tradicional apresentam 8mm de diâmetro, o que resulta numa área de secção de 50,26mm². Houve um cuidado em desenhar as alternativas conformáveis com uma área de secção igual ou muito semelhante. A distância mínima dos canais à superfície moldante é de 10mm como referido anteriormente. A Figura 37 mostra a distância do canal à superfície em vários pontos do molde, no caso de uma embalagem considerada complexa pelo fabricante devido à dificuldade de uniformização de temperaturas ao longo da superfície moldante.

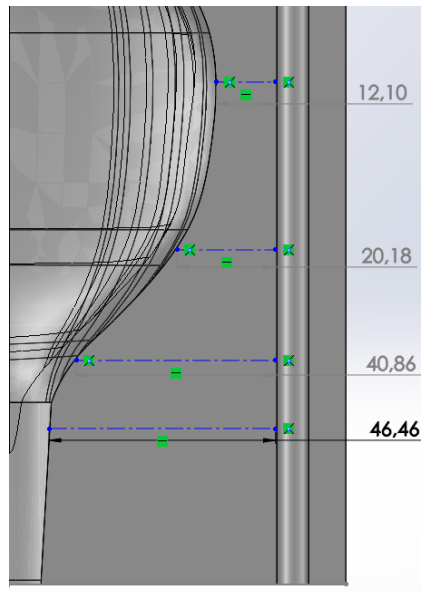


Figura 37 - Distância do canal tradicional Vertiflow à superfície moldante em vários pontos do molde.

A Figura 38 esquematiza o conjunto de provetes desenvolvidos dadas as condições retiradas da análise do molde e da informação recolhida junto dos fabricantes. A Figura 39 apresenta uma fotografia de todos os provetes produzidos. No total foram desenvolvidas seis geometrias para verificar a variação de desempenho entre diferentes secções de canais. Os provetes são designados por G(geometria)#(número do provete), sendo que o provete G#1 representa a configuração convencional encontrada nos moldes. G#2 é uma configuração de canais circulares com variação de diâmetro, e as suas variações, G#2.1 canais circulares com variação de diâmetro e sem estruturas em treliça, e o G#2.2 também com canal circular, mas com diâmetro constante e volume treliçado. G#3 é uma configuração com canais elípticos, o G#4 também apresenta geometria elíptica, mas com inclusão de alhetas trapezoidais ao longo do canal. Todos os canais apresentam aproximadamente a mesma área de secção de $50,26\text{mm}^2$ à semelhança dos canais dos moldes tradicionais. O esquema da Figura 38 e a fotografia da Figura 39

apresenta todos os provetes desenvolvidos que são de seguida descritos individualmente com mais detalhe.

A fotografia da Figura 40 apresenta a vista de corte do provete G#2 ampliada para visualizar o pormenor do volume substituído por treliças. É também possível ver a qualidade de acabamento conseguido pelo processo de SLM, notando-se a rugosidade própria deste processo.

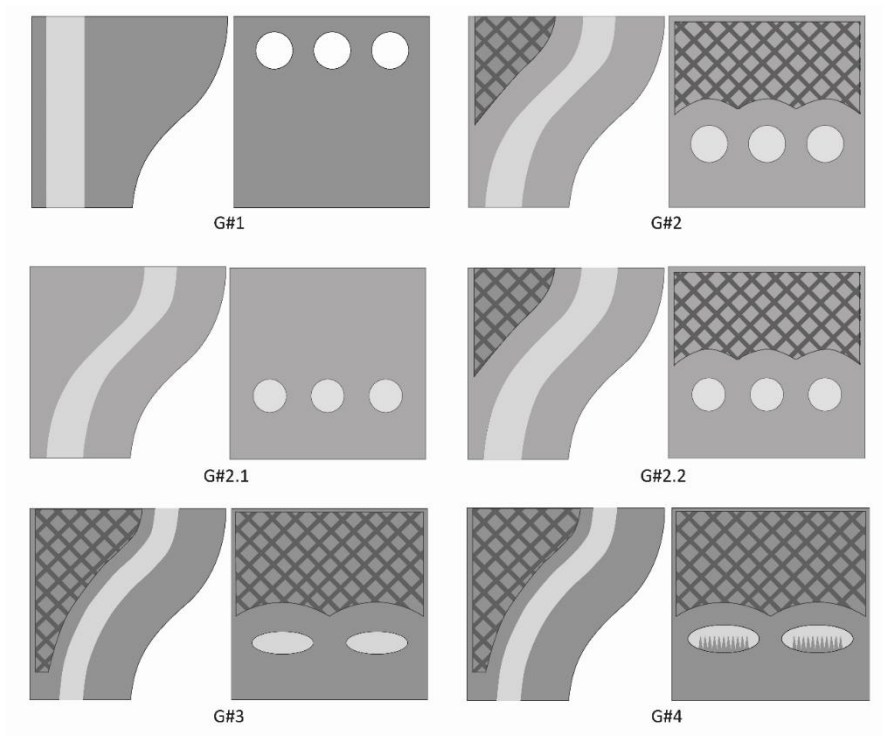


Figura 38 - Esquema dos provetes desenvolvidos. À esquerda de cada conjunto: vista de corte do canal. À direita do conjunto: vista de topo ou saída do canal

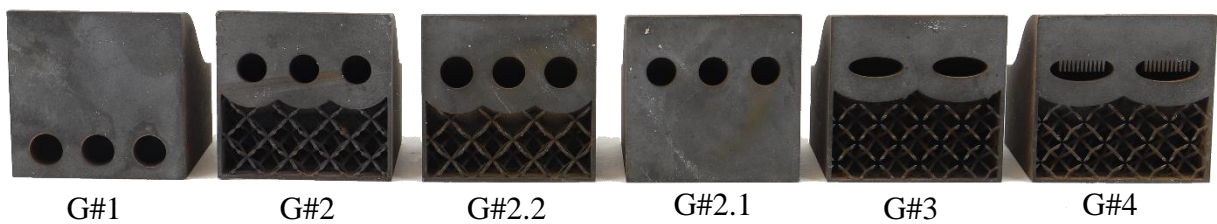


Figura 39 - Fotografia dos provetes desenvolvidos.

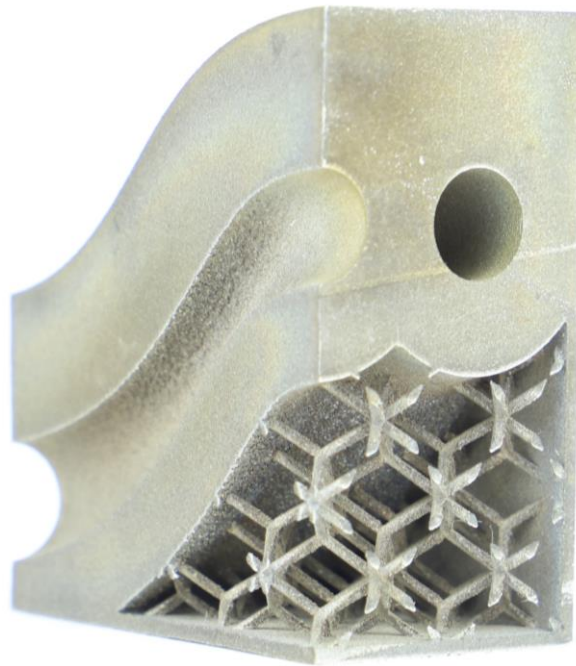


Figura 40 - Vista de corte do provete G#2. Pormenor do volume substituído por trilçhas, geometria do canal e acabamento rugoso próprio do SLM.

Provete G#1 – Vertiflow

O provete G#1 apresenta uma estrutura maciça com canais verticais simples, à semelhança do encontrado nos moldes de vidro tradicionais. A geometria de controlo Vertiflow tem o canal com um diâmetro de 8mm desenhado a uma distância situada entre 10mm e 30mm da superfície moldante. A Figura 41 apresenta o CAD do provete G#1 - Vertiflow, em vista de corte do canal e desenho de pormenor do perfil dos canais e do volume maciço entre o canal e a superfície moldante. A Figura 42 apresenta fotografias do provete produzido, depois de submetido a todos os testes.

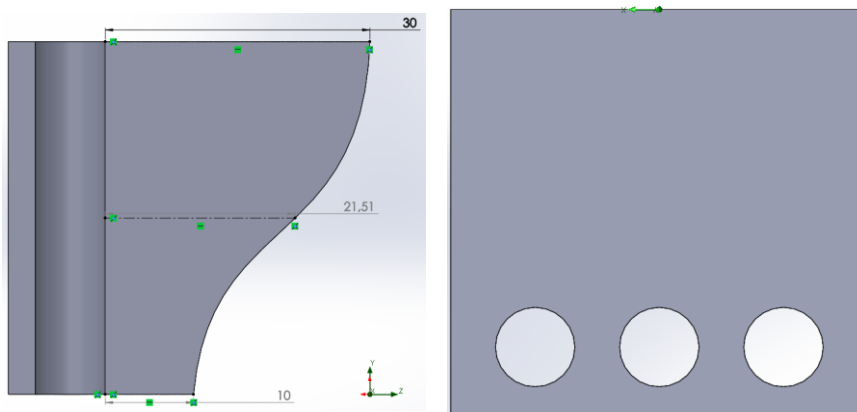


Figura 41 - CAD do provete G#1 Vertiflow.



Figura 42 - Fotografia do provete G#1.

Provete G#2 – Conformável Circular

O provete G#2 – Conformável Circular apresenta o mesmo diâmetro de entrada do canal que as furações apresentadas nos moldes de vidro, de 8mm, e acompanha a superfície moldante a uma distância de 10mm. Esta é uma solução frequentemente utilizada em canais conformáveis para a moldação de termoplásticos por injeção. Para este provete é expetável uma maior redução de temperatura comparativamente ao modelo tradicional Vertiflow.

A Figura 43 apresenta o CAD do provete G#2, em vista de corte do canal e pormenor dos canais e do volume treliçado. A Figura 44 apresenta fotografias do provete produzido, depois de submetido a todos os testes.

Foram realizadas simulações CFD para verificar a existência de vórtices. Com o estreitamento do canal na secção assinalada na Figura 45 foi conseguido uma maior velocidade do ar e uma redução substancial do vórtice formado.

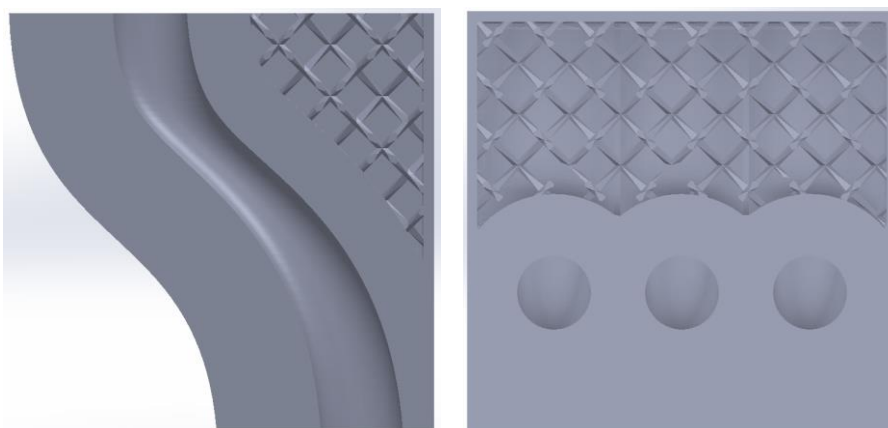


Figura 43 - CAD do provete G#2 Conformável Circular.



Figura 44 - Fotografia do provete G#2 Conformável Circular.

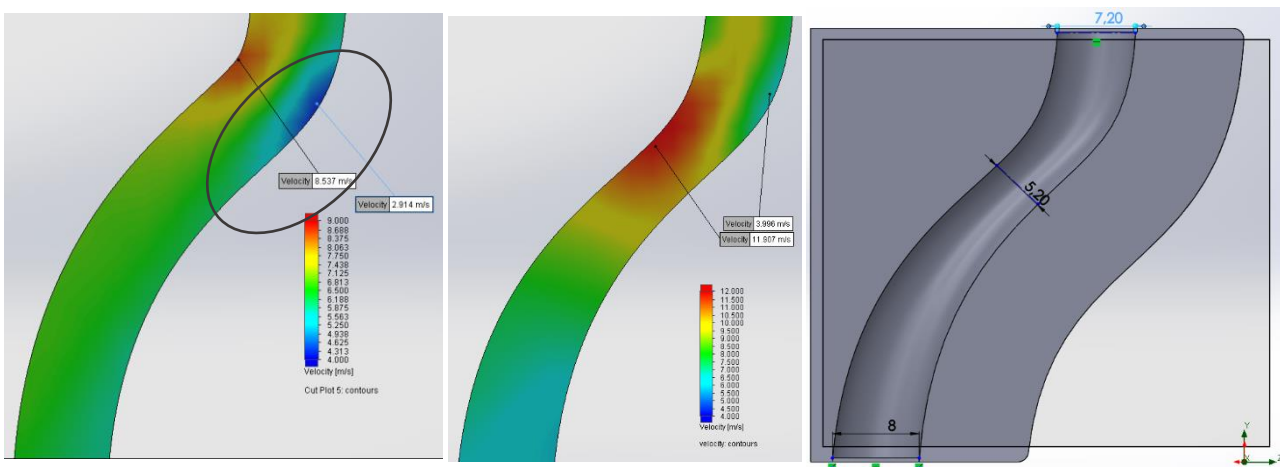


Figura 45 - a) Resultados de simulação CFD ao canal de secção constante ($V_{max}: 8,537\text{m/s}$; $V_{min}: 2,914\text{m/s}$); b) Resultados de simulação CFD ao canal de secção variável ($V_{max}: 11,907\text{m/s}$; $V_{min}: 3,996\text{m/s}$); c) Geometria final do canal

Foram geradas duas variações desta geometria. O provete G#2.1 – Conformável Circular sem treliças e o provete G#2.2 – Conformável Circular de secção constante. O motivo para o fabrico do provete G#2.1 (igual ao G#2 mas sem volume em treliça) foi o de testar o impacto da presença de volumes treliçados na redução da temperatura à superfície. Para este caso é expectável que se apresente uma variação pouco significativa ao nível da redução da temperatura na superfície do provete. O motivo para o fabrico do provete G#2.2 (igual ao G#2 mas com a secção do canal constante) é o de investigar se a formação de vórtice no canal influencia significativamente a redução da temperatura na superfície do provete.

Estas duas variações da geometria G#2 permitem retirar algumas conclusões possíveis de extrapolar para o fabrico de um molde de conformação de vidro, nomeadamente se a presença de vórtices é um fator negativo. E se a presença de volumes treliçados têm

impacto no arrefecimento do molde, que mesmo no caso de ser pouco significativa é ainda vantajoso porque simplifica o FA e reduz o custo da ferramenta.

A fotografia da Figura 46, é uma vista de corte do provete G#2. Esta peça que foi produzida em duplicado, foi sujeita a um corte por eletroerosão a fio que evidencia o volume treliçado e a variação do diâmetro do canal circular.



Figura 46 - Fotografia da vista em corte do provete G#2.

G#2.1 – Conformável Circular sem treliças

A Figura 47 apresenta o CAD do provete G#2.1 – Conformável circular sem treliças. A Figura 48 apresenta fotografias do provete produzido.

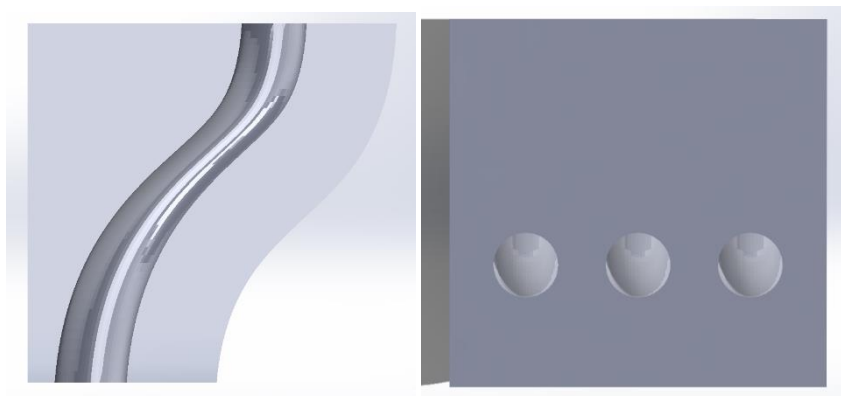


Figura 47 - CAD do provete G#2.1 Conformável Circular sem treliças.



Figura 48 - Fotografia do provete G2.1.

G#2.2 – Conformável Circular secção constante

A Figura 49 apresenta o CAD da geometria G#2.2 correspondente ao provete Conformável Circular de secção constante. A Figura 50 apresenta fotografias do provete produzido.

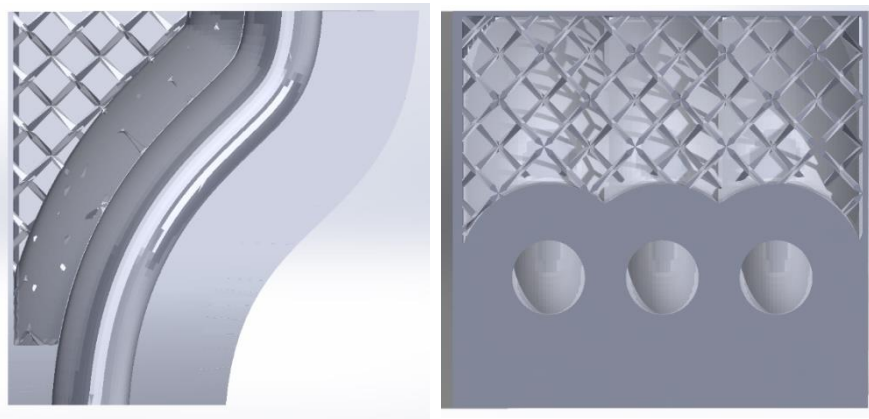


Figura 49 - CAD do provete G#2.2 Conformável Circular secção constante

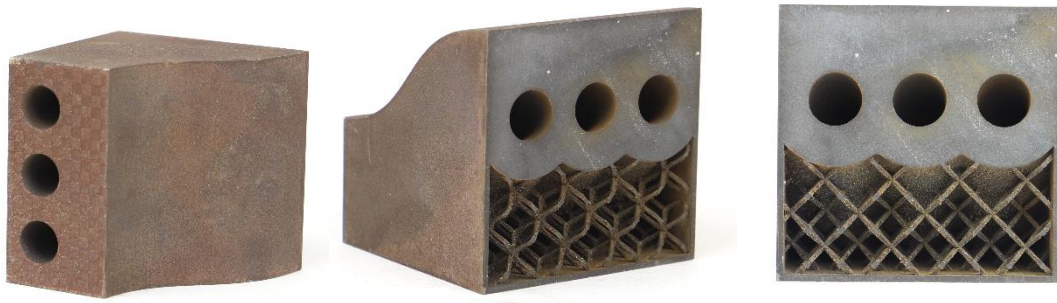


Figura 50 - Fotografias do provete G#2.2.

Provete G#3 – Conformável elíptico

A geometria de canal oval/elíptica é conhecida como potenciadora de transferência térmica, pela sua maior área de canal próxima das superfícies moldantes, também utilizada na moldação de termoplásticos em postigos produzidos por FA. Neste provete espera-se uma redução da temperatura na superfície moldante superior aos canais circulares. A Figura 51 apresenta o CAD do provete G#3 em vista de corte e pormenor da secção dos canais e do volume treliçado. A Figura 52 apresenta fotografias do provete produzido.

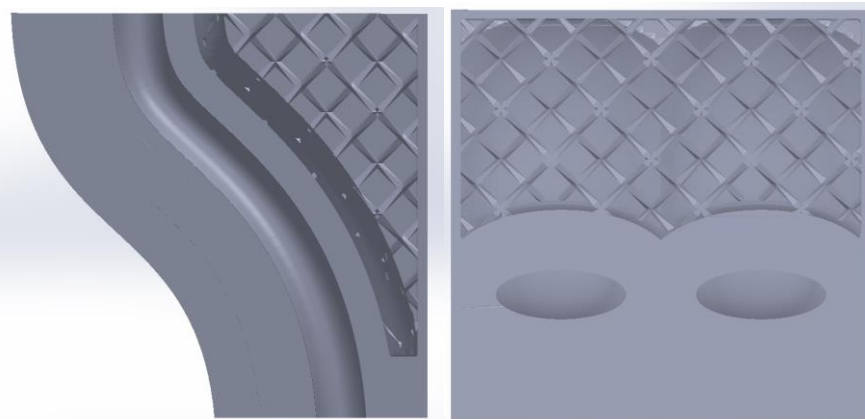


Figura 51 - CAD do provete G#3 - Conformável Elíptico



Figura 52 - Fotografias do provete G#3.

A fotografia da Figura 53, é uma vista de corte do provete G#3. Esta peça que foi produzida em duplicado, foi sujeita a um corte por eletroerosão a fio que evidencia o volume treliçado e o canal.

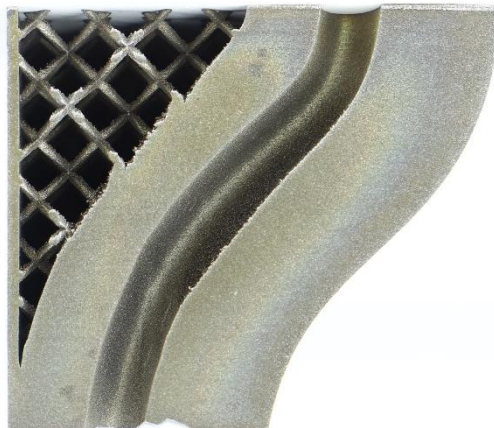


Figura 53 - Vista de corte do provete G#3.

Provete G#4 – Conformável elíptico com alhetas

O provete G#4 apresenta uma geometria elíptica semelhante ao G#3, no entanto, o presente provete G#4 incorpora alhetas trapezoidais ao longo do canal à semelhança de dissipadores de calor para componentes eletrónicos. A geometria elíptica dos canais foi também redimensionada para apresentar a mesma área de secção que os restantes provetes. As alhetas são geometrias utilizadas em permutadores de calor e dissipadores, pouco testadas em canais de arrefecimento conformáveis. A partir da investigação do provete G#4, uma eventual maior transferência térmica e uma menor temperatura registada à superfície são esperadas. A Figura 54 apresenta os CAD do provete G#4 em vista de corte e pormenor da secção dos canais e do volume treliçado. A Figura 56 apresenta o desenho de pormenor da geometria das alhetas trapezoidais.

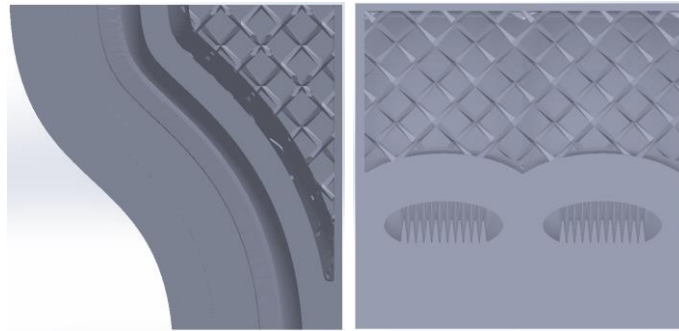


Figura 54 - CAD do provete G#4 - Conformável Elíptico com Alhetas.



Figura 55 - Fotografias do provete G#4.

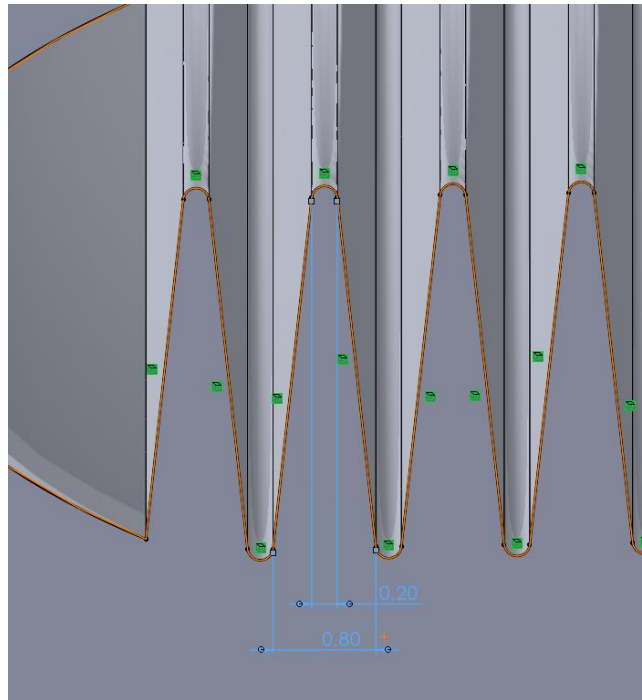


Figura 56 - Pormenor da geometria das alhetas trapezoidais

À exceção do provete G#1 (Vertiflow) e G#2.1 (Conformável circular sem treliças), os provetes G#2 (Conformável Circular), G#2.2 (Conformável Circular secção constante), G#3 (Conformável Elíptico) e G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) compreendem a aplicação de estruturas de treliça para redução de massa, volume e simplificação de produção por FA em cama de pó. Estas estruturas são aplicadas na zona do provete que se estima sem impacto na transferência térmica, à semelhança das propostas de molde apresentadas anteriormente. As geometrias G#2.1 (Conformável Circular sem treliças) e G#2.2 (Conformável Circular secção constante) servem como modelos intermédios para permitir identificar a influência da formação de vórtices, em canal de secção constante, no arrefecimento da superfície moldante, assim como a influência da presença de um volume treliçado para entender o impacto deste no arrefecimento da superfície.

3.5.1. Concepção e desenvolvimento da peça para alimentar o ar para arrefecimento dos canais

Foi realizada a concepção e desenvolvida uma primeira versão da peça para alimentar o ar para arrefecimento dos canais (Ponteira v1) com um cone com 20mm de comprimento. Esta ponteira é aplicada como terminal de uma pistola de ar comprimido e permite direcionar o fluxo de ar para os canais de arrefecimento dos provetes. Após simulações CFD desta solução verificou-se um fluxo de ar preferencial pelo canal central. A variação da velocidade do ar no canal central para os restantes canais de arrefecimento é de cerca de 29.27% para a ponteira v1. Para uma segunda versão, a ponteira V2, foi alongado o comprimento da geometria cônica para 40mm. Foi possível com esta alteração, baixar a variação da velocidade do ar do canal central para os restantes canais, para aproximadamente 20%. As simulações foram realizadas com as condições de entrada de ar de 0,0001 kg/s.

As Figura 57 e Figura 58 evidenciam as simulações realizadas para o desenvolvimento da ponteira utilizada para alimentar o ar de arrefecimento nos canais.

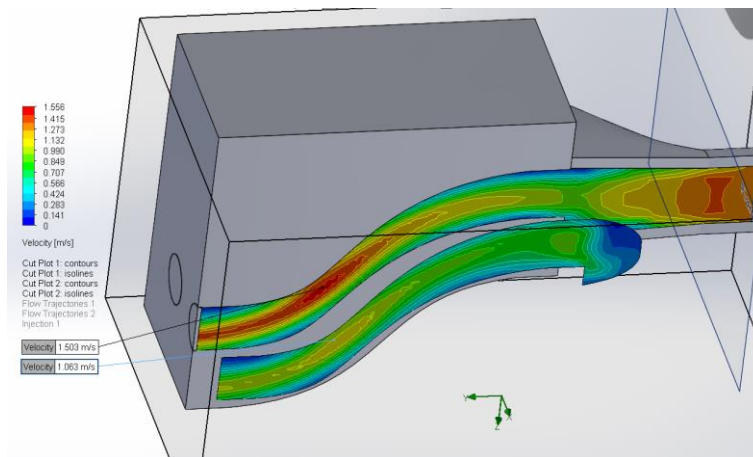


Figura 57 - Simulação para verificar a influência da peça plástica para passagem do ar comprimido para as experiências. Ponteira v1

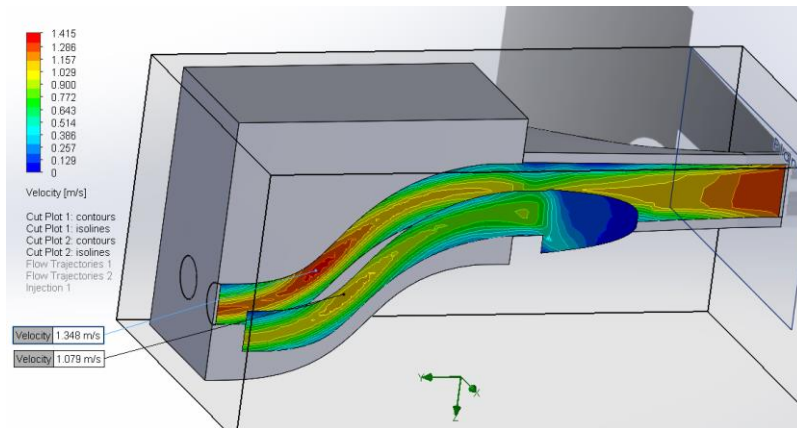


Figura 58 - Simulação para verificar a influência da peça plástica para a passagem do ar comprimido para as experiências. Ponteira v2

Em suma, conclui-se que o fluxo de ar apresenta uma maior velocidade no canal central em comparação aos outros canais em cerca de 29.27% para a versão 1 da ponteira. Com o redesenho e o desenvolvimento da versão 2 da ponteira reduziu-se a diferença na velocidade do fluxo do canal central para os outros canais para 19.95%.

A segunda versão da ponteira foi produzida em ABS no equipamento Stratasys uPrint para os ensaios de baixa temperatura e que serviu também como prova de conceito para a configuração dos experimentos, realizando o desempenho esperado. Foi também alvo destes testes, verificar que não existe um arrefecimento superior na zona central do provete em comparação com a restante superfície.

No equipamento Trumpf TruPrint1000 foi produzida a ponteira em Ti6Al4V para os ensaios de alta temperatura dado que o ABS não é adequado para os referidos ensaios. As fotografias da Figura 59 apresentam ambas as ponteiras produzidas, em ABS e na liga de titânio.

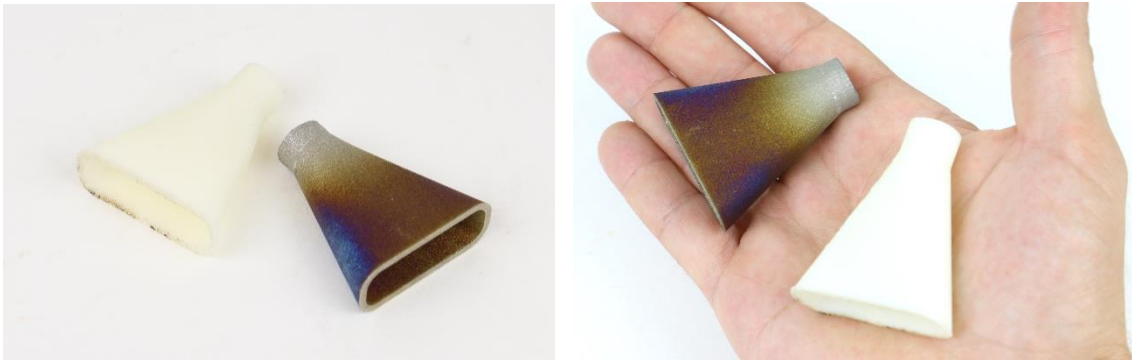


Figura 59 - Fotografias das ponteiras produzidas. ABS e Ti6Al4V.

3.5.2. DoE aplicado aos provetes

Para os ensaios de teste ao desempenho dos provetes, foram definidas três temperaturas para testes: 200°C, 500°C e 650°C. Os testes a 200°C foram os primeiros a serem realizados, inicialmente como prova de conceito, para testar a ponteira, a configuração dos experimentos, a aquisição de dados termográficos, e também permitiram retirar conclusões preliminares ao desempenho das várias geometrias.

Dada a viabilidade destes primeiros ensaios a baixa temperatura, a segunda fase de testes foi realizada a 500°C. Este é um valor de referência para a temperatura de trabalho dos moldes de conformação de vidro de embalagem na indústria [20], [22]. Do ponto de vista do projeto de moldes para conformação de embalagens por sopro, estes ensaios apresentam-se como os mais pertinentes para esta área.

O terceiro ensaio foi realizado a 650°C, um valor de temperatura de trabalho de moldes em outras áreas de conformação de vidro em que a temperatura excede os 550°C, como no trabalho de Jiwang Yan et al (590°C), e outros valores retirados do artigo de Peter Manns et al que referem que a variação da temperatura do molde situa-se entre os 590°C e os 665°C [31], [32]. Dada a limitação dos parâmetros de calibração do equipamento termográfico se encontrar num intervalo de 100°C a 650°C, foi definido o valor máximo permitido pelo equipamento de 650°C para os últimos ensaios. Para o projeto de moldes para conformação de produtos por prensagem, tais como vidro de mesa, vidro ótico e outros vidros técnicos, etc, os referidos ensaios a temperatura mais elevada mostram-se como os mais pertinentes para a conformação dos referidos produtos.

Após o provete atingir a temperatura desejada, é retirado do forno com auxílio de luvas para alta temperatura e colocado em cima de material refratário para evitar a transferência térmica para outras superfícies. De seguida é forçada a passagem de ar pelos canais de arrefecimento, registando-se a temperatura através de termografia em modo de vídeo.

Com vista à redução de erros associados à medição das temperaturas, a temperatura do forno é medida com um termómetro de infravermelhos para validar o valor da temperatura inicial do teste. Ao comparar os valores das temperaturas e as imagens termográficas é então possível tratar os dados e discutir os resultados para compreender o impacto das diferentes geometrias dos canais de arrefecimento.

Para os primeiros ensaios foi utilizado um forno/estufa aquecida a 200°C, do fabricante ALPINA modelo EASYLINE (Figura 60). Para verificar a temperatura dos fornos foi também utilizado um termómetro de infravermelhos do fabricante XINDAR TID200 (Figura 61).



Figura 60 - Forno/estufa ALPINA EASYLINE.

Para a segunda temperatura de testes foi usado um forno de câmara elétrica do fabricante TERMOLAB MLR (Figura 62) aquecido a 500°C. Na terceira temperatura de testes os provetes foram aquecidos a 650°C também no forno elétrico mencionado anteriormente.



Figura 61 - Termómetro digital infravermelho XINDAR TID200.

Para adquirir os dados de temperatura dos provetes foi utilizada uma câmara termográfica em modo de filmagem a 6 frames por segundo, colocada em tripé a cerca de 50cm do provete, de marca FLIR modelo A655SC (Figura 64) [33]. O software utilizado para a captação de imagem foi o ResearchIR nativo da FLIR. A Figura 63 apresenta o esquema da configuração experimental dos ensaios. A Figura 68 apresenta a interface do software ResearchIR, e a Figura 69 identifica as zonas de medição e os respetivos cursores, assim como o sentido do fluxo de ar.



Figura 62 - Forno elétrico TERMOLAB MLR.

Entre os testes de diferentes provetes foi dado um tempo de espera para permitir estabilizar a temperatura dos fornos no valor pré-definido de temperatura. O tempo de retirar o provete do forno, colocá-lo sobre o material refratário e iniciar o teste de leitura termográfica foi de cerca de 6 segundos. As fotografias das Figura 65 e Figura 66

evidenciam o momento dos testes em que é dada a aquisição de vídeo durante a passagem de ar nos canais de arrefecimento do provete.



Figura 64 - Câmera termográfica FLIR A655SC.

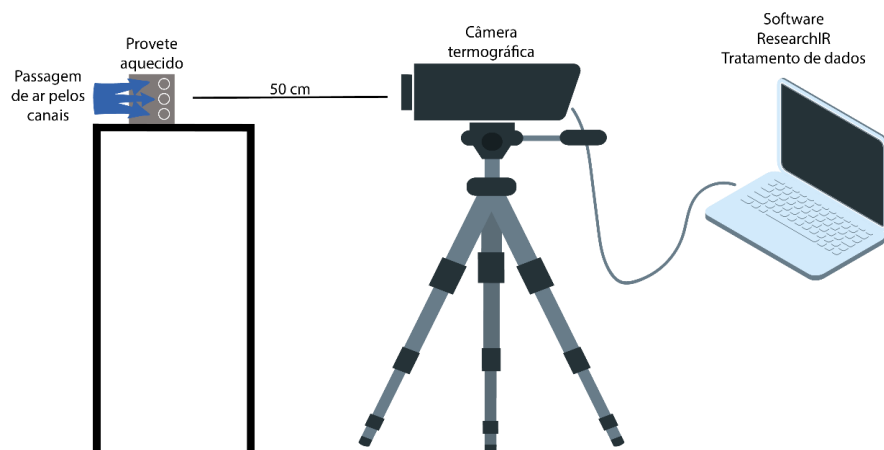


Figura 63 – Esquema da configuração experimental dos ensaios realizadas



Figura 65 - Fotografia da realização dos testes aos provetes a baixa temperatura (200°C)



Figura 66 - Fotografia da realização dos testes aos provetes a alta temperatura (500°C e 650°C)

A fotografia da Figura 67 mostra alguns dos materiais presentes durante os testes, nomeadamente vários materiais de enfora refratários, luvas de proteção e pistola de ar com a ponteira desenvolvida no presente trabalho e produzida em liga de Ti6Al4V. É de salientar que após um teste com determinado provete, antes de testar o próximo, é trocado o material refratário por outro a temperatura ambiente. Deste modo não existe a influência térmica de testar um provete com material refratário à temperatura elevada do ensaio anterior.



Figura 67 - Bancada de trabalho, material de enforna (refratários), luvas de proteção e pistola de ar com a ponteira desenvolvida instalada.

Por cada provete foram realizadas medições em 6 pontos de 5 em 5 segundos:

- 2 pontos na superfície próxima da alimentação de ar (cursor 1 & 2)
- 2 pontos na superfície intermédia (cursor 3 & 4)
- 2 pontos na superfície junto à saída dos canais (cursor 5 & 6)

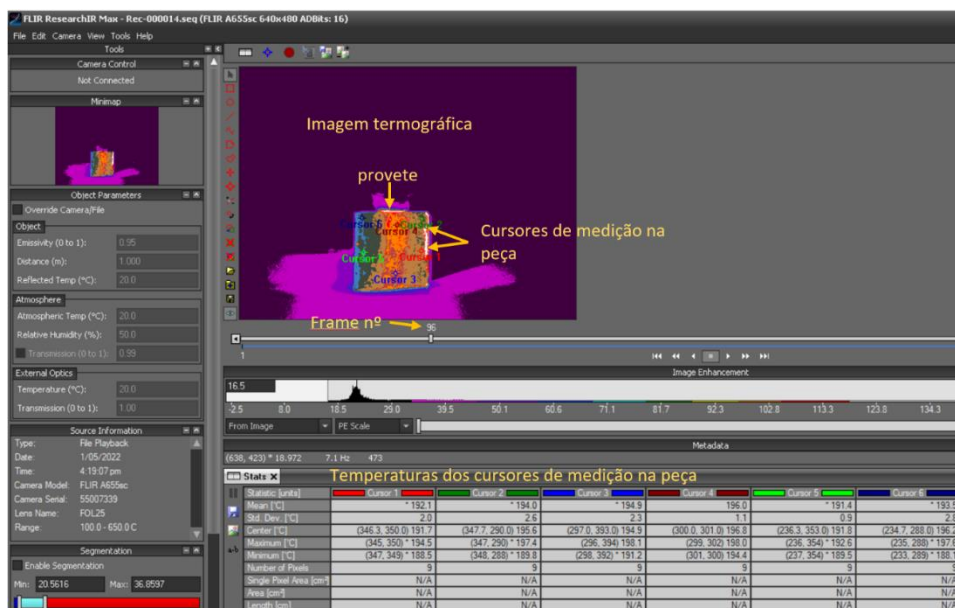


Figura 68 - Software ResearchIR utilizado para aquisição e tratamento das filmagens termográficas no decorrer das experiências.

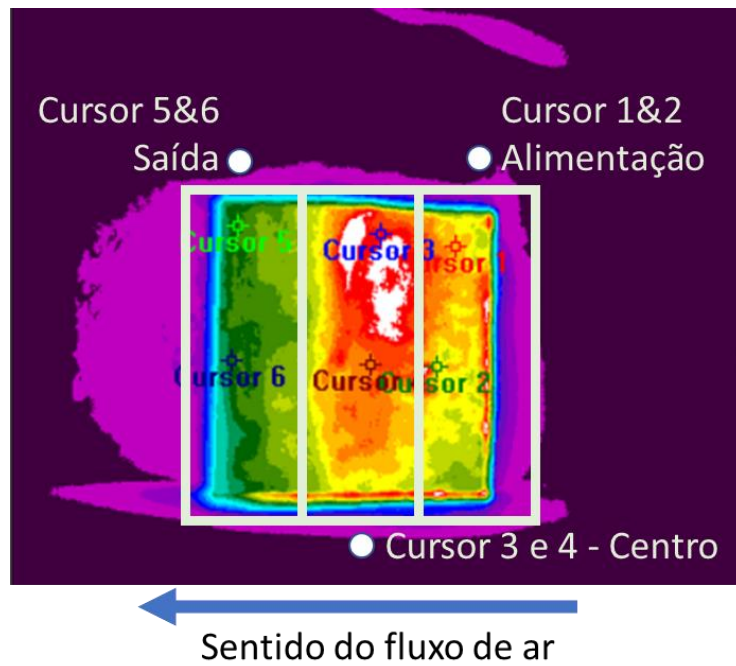


Figura 69 - Identificação das zonas de medição de temperatura na superfície moldante do provete e do sentido do fluxo de ar.

Foi calculada a média de temperaturas das medições dos 2 pontos de cada secção alimentação/centro/saída.

O tratamento dos resultados em excel foram utilizados para calcular os seguintes pontos:

- Cálculo da variação térmica percentual da superfície
- Cálculo da redução percentual de temperatura em cada secção
- Cálculo da média das temperaturas à superfície
- Apresentação dos dados em gráficos

4. Análise de Resultados e Discussão

No presente capítulo são apresentados os dados retirados das experiências realizadas. Os dados foram tratados em excel e ilustrados na forma de gráfico para uma compreensão mais objetiva dos mesmos, dividido em subcapítulos por temperatura dos ensaios realizados.

4.1. Ensaio realizados a 200°C

Os gráficos das Figura 70 a Figura 74 apresentam as curvas relativas aos valores das tabelas presentes no Anexo A para os dados referentes aos ensaios realizados a 200°C.

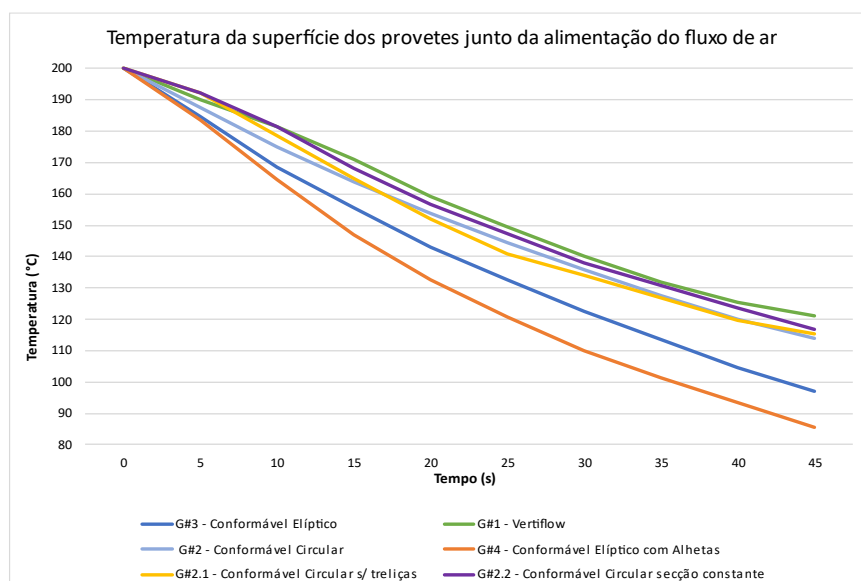


Figura 70 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de alimentação do fluxo de ar (ensaio realizado a 200°C)

O gráfico da Figura 70 apresenta a evolução da temperatura registada no primeiro setor na zona onde é feita a alimentação do fluxo de ar para arrefecimento ao longo do tempo da experiência. Nesta secção é de denotar a maior eficácia dos provetes elípticos, G#3 – Conformável Elíptico e do G#4 Conformável Elíptico com alhetas, na remoção de calor da superfície dos provetes. O provete com alhetas de arrefecimento mostra-se como o mais eficaz na remoção de calor, como esperado, devido à maior área de superfície do canal. Os provetes com canal de geometria circular apresentam um comportamento e eficácia semelhante ao provete G#1 – Vertiflow de controlo, isto deve-se ao facto dos canais se encontrarem à distância de 10mm da superfície moldante e de partilharem do mesmo diâmetro de 8mm.

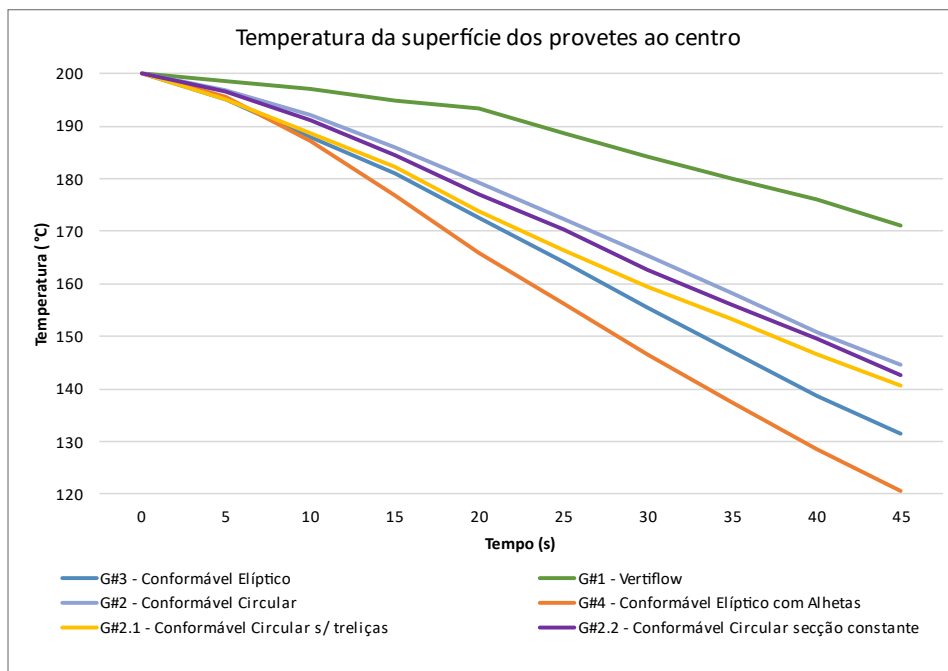


Figura 71 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção central dos provetes (ensaios realizados a 200°C)

No gráfico da Figura 71, relativo à secção central do provete, são evidentes os ganhos de eficácia na remoção de calor dos provetes com canais de arrefecimento conformáveis. Nesta secção, os canais de arrefecimento conformáveis continuam a uma distância de 10mm da superfície, enquanto o provete G#1 – Vertiflow se encontra a uma maior distância (cerca de 20mm) da superfície, à semelhança do que acontece em moldes de conformação tradicionais.

No gráfico da Figura 72 são apresentados os dados de temperatura versus tempo relativos à secção final do provete, junto da zona de saída do ar nos canais. Neste ponto, o provete

G#1 - Vertiflow apresenta os seus canais a uma distância de 30mm da superfície moldante.

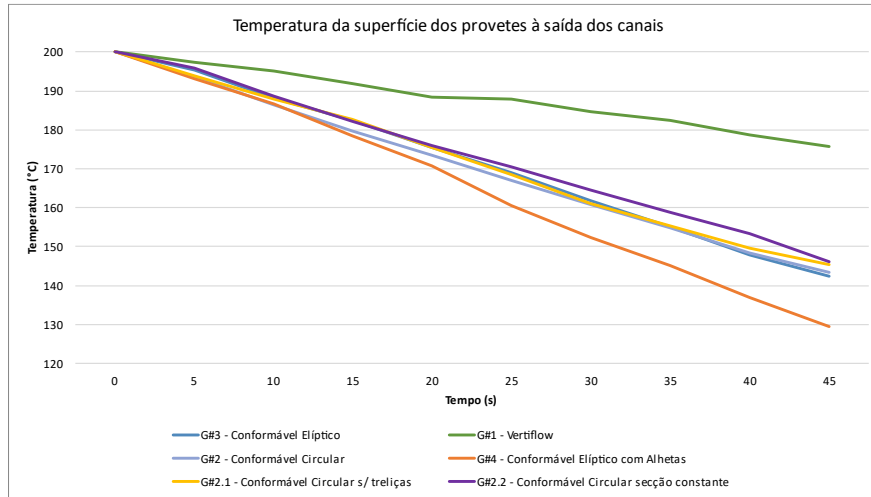


Figura 72 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de saída dos canais (ensaios realizados a 200°C)

Relativamente às alternativas de canais de arrefecimento conformáveis, tanto no setor central, como no de saída do provete, a relativamente maior proximidade dos canais à superfície moldante apresenta-se como significativamente mais eficaz para a remoção de calor da superfície do molde.

Em todos os setores de medição, o provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas apresenta o melhor desempenho no que diz respeito à eficiência em reduzir a temperatura da superfície moldante comparativamente a todas as outras geometrias de canal. Seguido do G#3 – Conformável Elíptico, e dos provetes conformáveis de geometria circular

G#2(Conformável Circular), G#2.1(Conformável Circular sem treliças) e G#2.2 (Conformável Circular secção constante).

O gráfico da Figura 73 apresenta as médias da temperatura à superfície dos vários provetes versus tempo, permitindo retirar as mesmas conclusões que foram apresentadas na discussão dos gráficos anteriores.

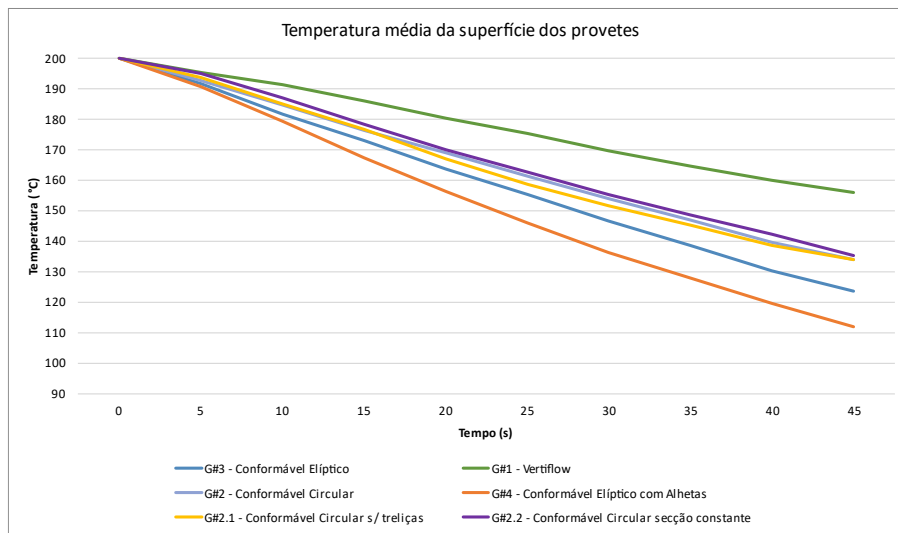


Figura 73 - Gráfico da temperatura média da superfície dos provetes versus tempo

Neste ponto é de notar que os provetes circulares G#2; G#2.1 e G#2.2 apresentam desempenhos muito similares. Para temperaturas de 200°C conclui-se que as variações das geometrias de canais circulares, de secção variável (G#2), sem presença de treliças

(G#2.1) e de secção constante (G#2.2), são pouco significativas na eficiência do arrefecimento da ferramenta moldante.

A Figura 74 mostra a evolução percentual da variação térmica da superfície ao longo do tempo.

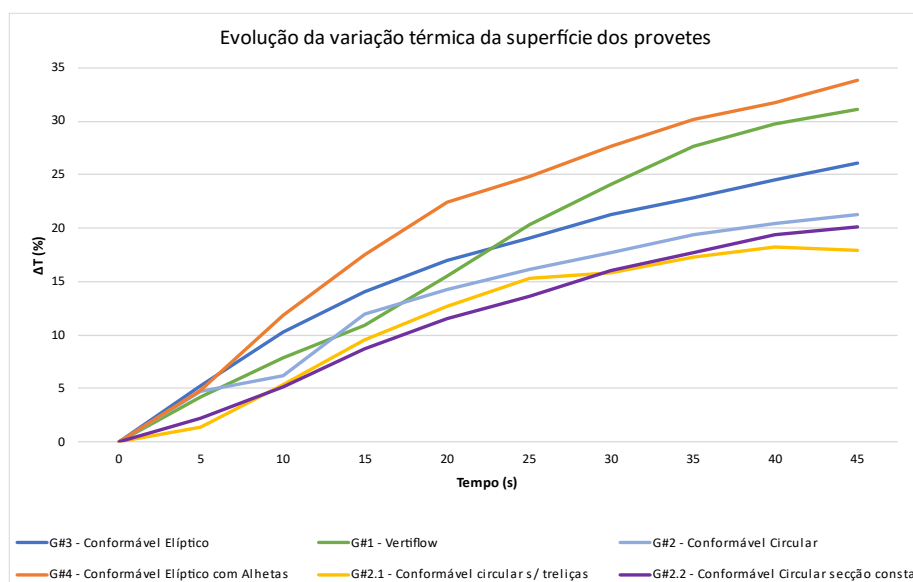


Figura 74 - Gráfico de variação térmica em percentagem ao longo do tempo dos vários provetes (ensaios realizados a 200°C).

Do ponto de vista da variação térmica na superfície, ou seja, o diferencial entre a temperatura mais alta e a temperatura mais baixa registadas a cada momento, os provetes circulares (G#2, G#2.1 e G#2.2) apresentam uma menor variação.

A partir dos 25 segundos do ensaio, a geometria G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) é a única a apresentar maior variação térmica na superfície do provete comparativamente com a geometria tradicional G#1. Isto deve-se à elevada redução de temperatura

observada no primeiro setor, onde é feita a alimentação do ar à temperatura ambiente nos canais de arrefecimento.

Ao nível do arrefecimento, todas as geometrias com canais conformáveis mostram-se mais eficientes do que a geometria tradicional G#1 – Vertiflow.

4.2. Ensaio realizados a 500°C

Os gráficos das Figura 75 a Figura 79 apresentam as curvas relativas aos valores das tabelas presentes no Anexo A para os dados referentes aos ensaios a 500°C.

O gráfico da Figura 75 relativo à temperatura da superfície junto da alimentação do fluxo de ar permite tirar as mesmas conclusões que nos ensaios a 200°C, nomeadamente a elevada eficácia dos canais elípticos com destaque no provete G#4 – Elíptico com alhetas.

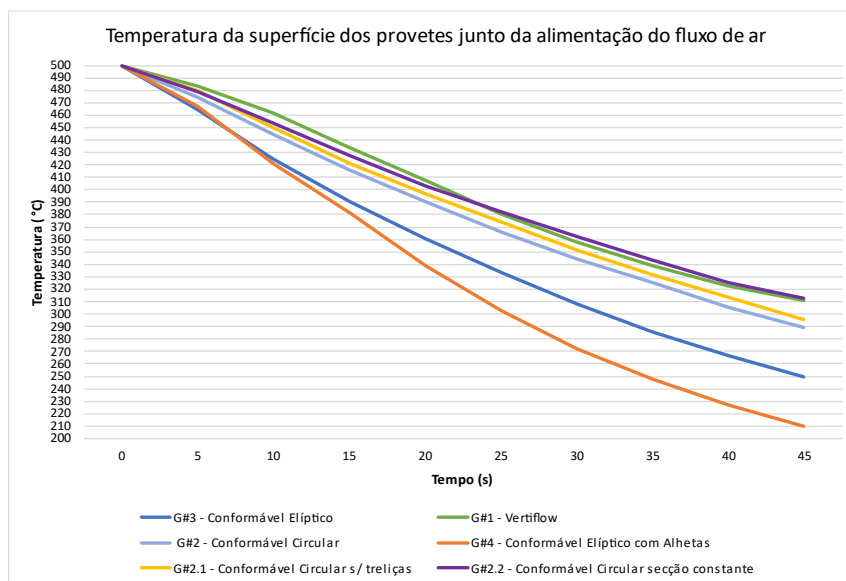


Figura 75 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de alimentação do fluxo de ar (ensaio realizado a 500°C)

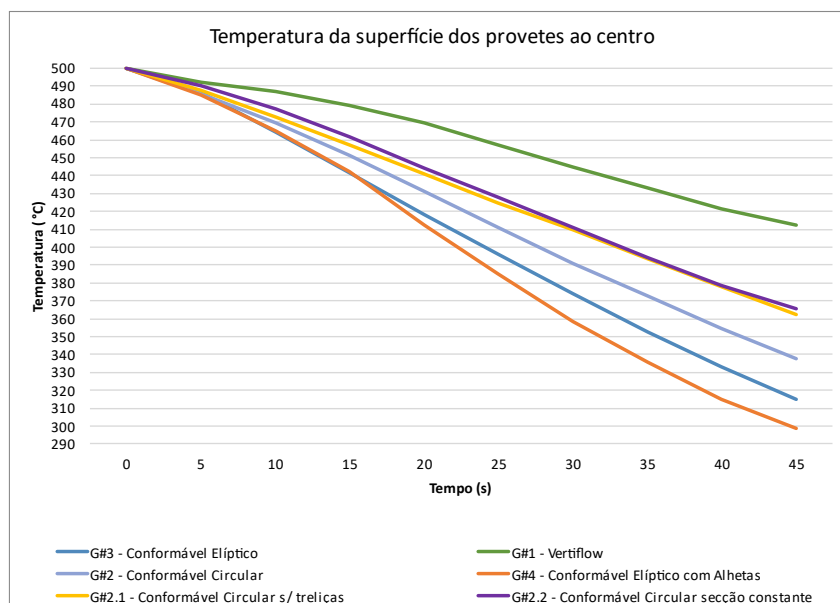


Figura 76 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção central

No gráfico da Figura 76, é possível concluir também, à semelhança dos ensaios a 200°C, a melhor performance dos canais conformáveis em comparação ao G#1 Vertiflow. Destaca-se, porém, o melhor desempenho do canal G#2 – Conformável Circular em comparação com as suas variações, sem volume treliçado (G#2.1) e com secção constante (G#2.2), no setor central e no setor final à saída dos canais do provete, como evidenciado no gráfico da Figura 77. Devido à mais alta temperatura do metal, a 500°C, no caso do provete G#2.1 – Conformável sem alhetas, este efeito pode ser explicado pela presença de um maior volume de metal maciço. O ar aquece ao remover calor na secção inicial, perdendo eficácia nos seguintes setores devido à presença de um volume maior de metal a alta temperatura em comparação ao caso com a presença de treliças que consequentemente apresenta menor volume de material passível de arrefecer. É porém previsível que numa situação de aplicação em molde de conformação, a direção do fluxo de calor é dada da superfície moldante em direção ao canal, já nesta situação, o material

encontra-se todo a uma temperatura uniforme, o que não se verifica necessariamente em condições reais de produção.

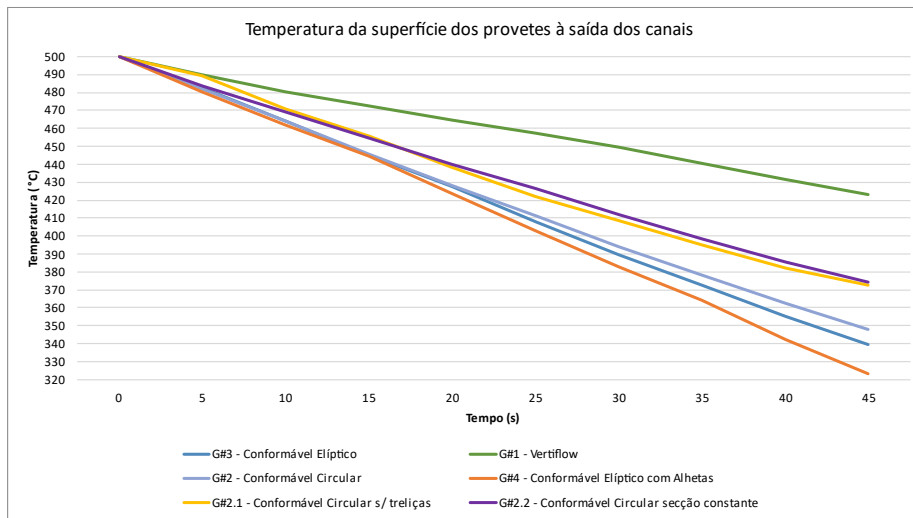


Figura 77 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de saída dos canais (ensaio realizado a 500°C)

No caso do provete G#2.2 – Conformável Circular secção constante, o seu menor desempenho na redução da temperatura à superfície moldante, em comparação com a sua alternativa de secção variável (G#2), pode ser explicado pela diferença na velocidade do fluxo de ar. No provete G#2 (secção variável), o estreitamento do canal leva a um aumento significativo da velocidade do ar em comparação com o canal de secção constante (G#2.2). Ou seja, a diferença na eficácia da remoção de calor entre estas duas alternativas pode ser explicada pelo aumento da temperatura do ar dentro do canal devido à sua menor velocidade de passagem. No caso do provete G#2, a aceleração do ar é influenciada pela redução da secção do canal incrementando a eficiência da troca de calor das paredes do canal para o ar, ajudando a reduzir a sua temperatura, comparativamente ao que acontece para o provete G#2.2, com canal de secção constante. Conclui-se, pela análise das curvas de temperaturas, que as três geometrias circulares apresentam bastante melhor desempenho do que o provete representativo do caso convencional G#1 – Vertiflow, tanto na eficiência de arrefecimento, como também apresentam uma variação térmica menor. É ainda possível retirar estas mesmas conclusões pela análise da Figura

78, onde é apresentado o gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de saída dos canais.

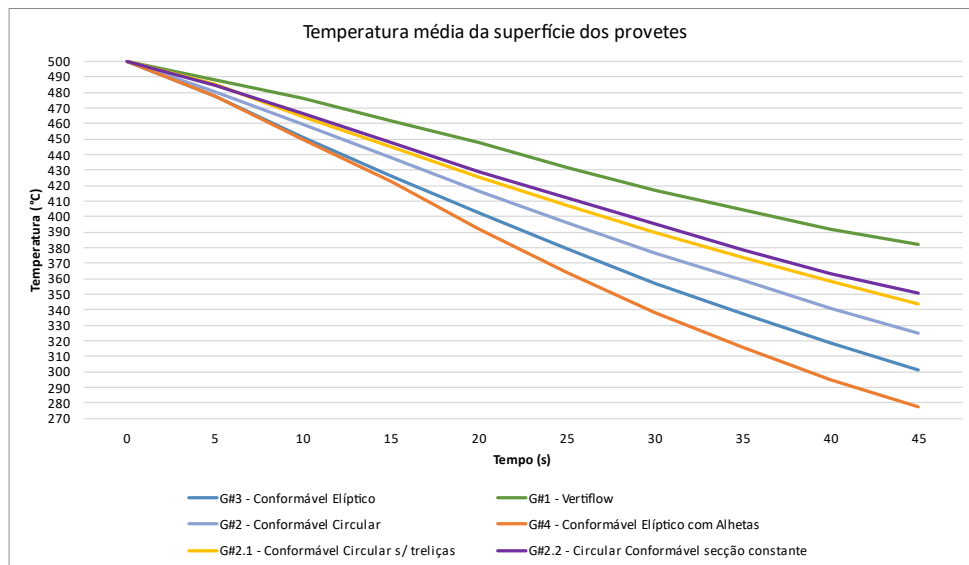


Figura 78 - Gráfico da temperatura média da superfície dos provetes versus tempo (ensaios realizados a 500°C)

No gráfico da Figura 79, é possível verificar que os provetes de geometria circular, também para os ensaios a 500°C, apresentam os valores de variação térmica mais baixos que as restantes alternativas propostas. O provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas, apresenta o pior desempenho segundo este fator, novamente pela elevada redução de temperatura no primeiro setor junto da alimentação de ar nos canais de arrefecimento. Ainda ao nível de variação térmica, é nos ensaios a 500°C, mais evidente que a presença de um maior volume maciço no provete G#2.1 (Conformável Circular sem treliças) leva ao registo de temperaturas mais altas na secção central e na secção final do provete, consequentemente elevando o diferencial de temperaturas registadas na superfície moldante.

A Figura 79 permite também concluir que os provetes com canais conformáveis circulares de secção variável (G#2) e circular de secção constante (G#2.2) apresentam valores muito semelhantes ao nível de variação térmica. Porém, o provete G#2 apresenta valores mais

baixos da temperatura média da superfície, mostrando-se mais eficaz que a sua alternativa de secção constante.

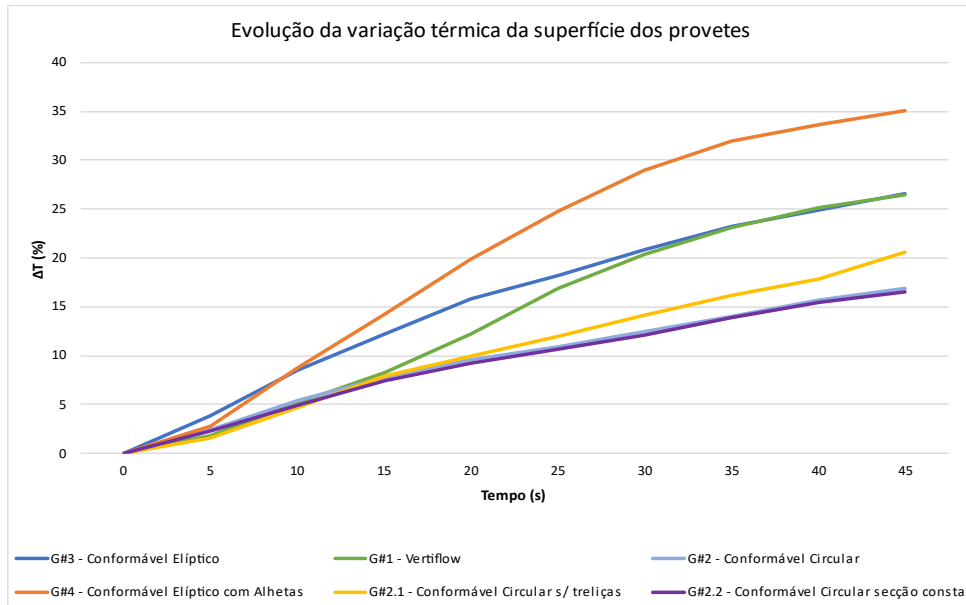


Figura 79 - Gráfico de variação térmica em percentagem ao longo do tempo dos vários provetes (ensaios realizados a 500°C)

4.3. Ensaio realizados a 650°C

Os gráficos das Figura 80 a Figura 84 apresentam as curvas relativas aos valores das tabelas presentes no Anexo A para os dados referentes aos ensaios a 650°C.

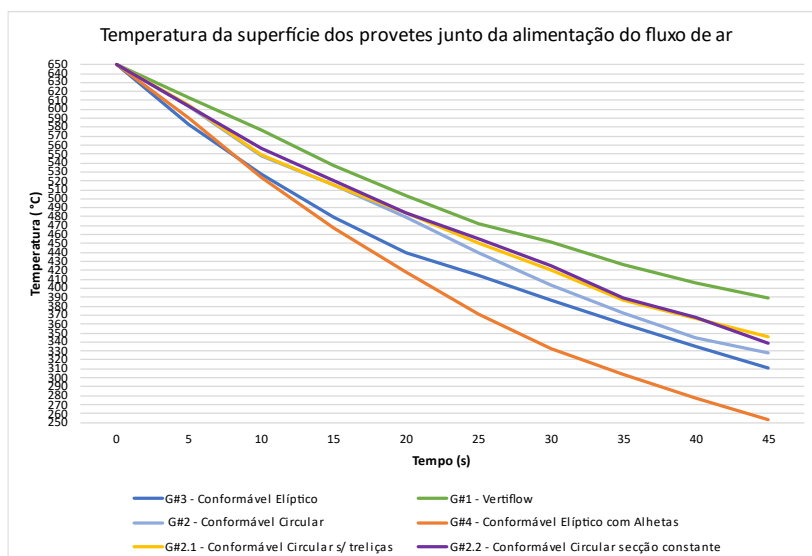


Figura 80 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de alimentação do fluxo de ar (ensaios realizados a 650°C)

O gráfico da Figura 80 permite retirar as mesmas conclusões que já foram apresentadas para os ensaios realizados a 500°C relativamente à secção inicial junto da alimentação do fluxo de ar, mantendo-se a ordem de desempenho notada anteriormente, com a redução de temperatura mais significativa para os canais conformáveis elípticos, destacando-se o G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas. O mesmo se verifica para a secção central dos provetes, representado no gráfico da Figura 81.

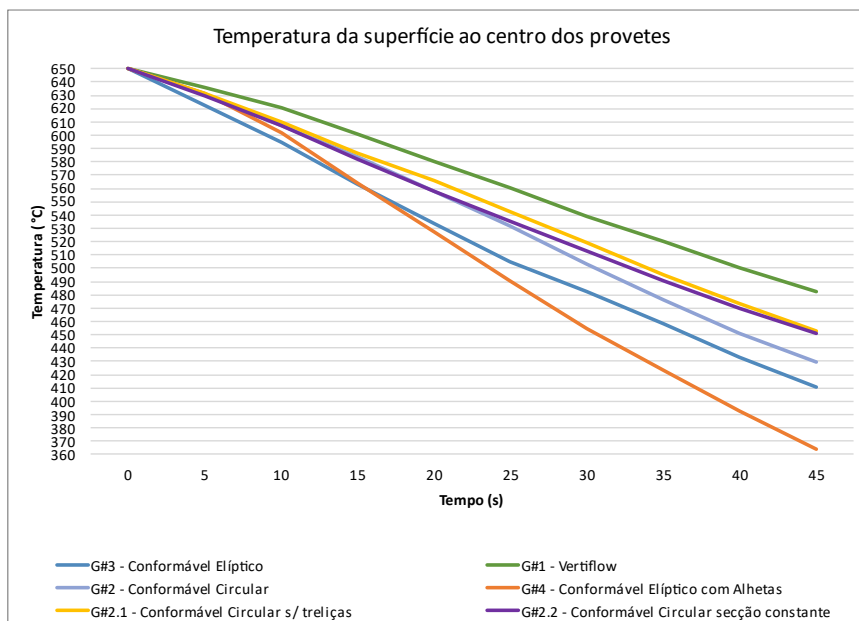


Figura 81 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção central

Curiosamente, no gráfico da Figura 82, referente aos dados de temperatura adquiridos no setor final do provete, junto à saída dos canais, é possível observar que o provete G#3 – Conformável Elíptico obteve um desempenho significativamente melhor do que o provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas, quebrando a tendência observada anteriormente nos ensaios realizados a 200°C e a 500°C. Esta observação pode ser explicada pelo facto de que a uma temperatura mais elevada (650°C), a temperatura do ar no canal aumenta de tal forma, que a transferência térmica no último setor perde eficácia de forma significativa. Já a geometria G#3 – Conformável Elíptico, devido ao facto do ar de arrefecimento não remover tanta temperatura ao metal nos primeiros setores da

superfície do provete, apresenta uma temperatura menos elevada no último setor, promovendo uma troca térmica mais eficiente no referido setor do provete.

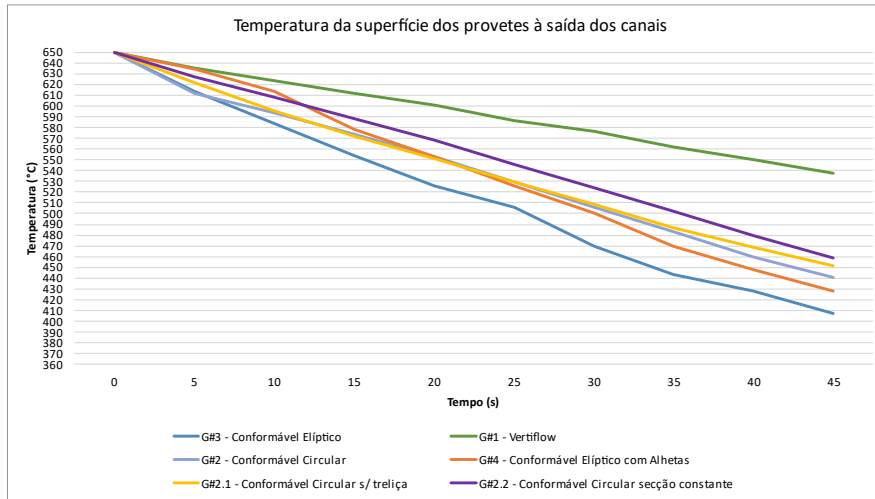


Figura 82 - Gráfico de temperatura versus tempo dos vários provetes na secção de saída dos canais (ensaios realizados a 650°C)

Apesar do desempenho do provete G#4 (Conformável Elíptico com Alhetas) ter sido pior, no setor de saída dos canais, do que a tendência observada nos outros ensaios, este é ainda o provete que apresenta melhores resultados ao nível da temperatura média da superfície, mostrando-se o mais eficiente, como se pode observar no gráfico da Figura 83.

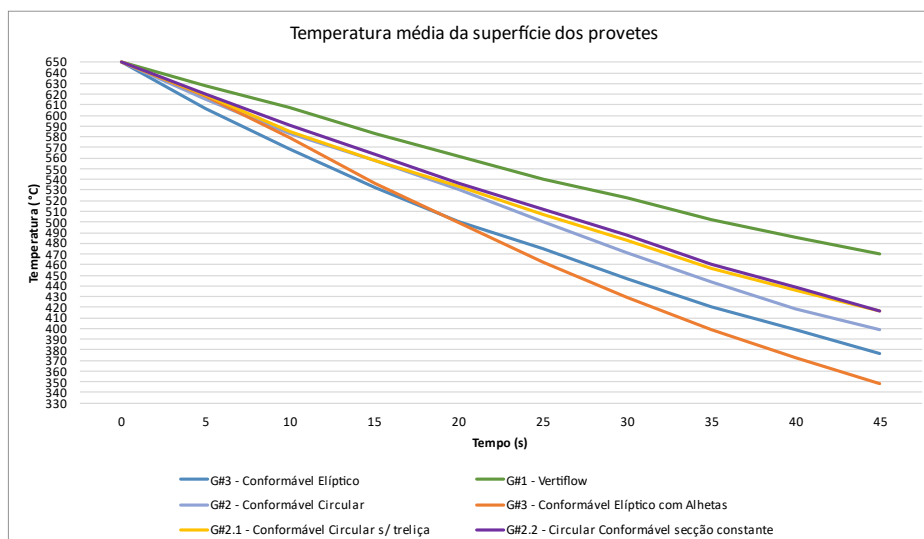


Figura 83 - Gráfico da temperatura média da superfície dos provetes versus tempo (ensaios realizados a 650°C)

Isto deve-se à elevada redução de temperatura que este provete apresenta nos dois

primeiros setores, mas que influencia negativamente a variação térmica da superfície, tendo superado uma variação de 40% no momento final do ensaio, como é possível observar no gráfico da Figura 84. Tendo em conta a redução de temperatura à superfície dos provetes e a sua variação térmica, novamente, as alternativas com canais de arrefecimento conformáveis circulares destacam-se pela positiva. Para este nível de temperaturas (650°C) a geometria de canal G#3 – Conformável Elíptico é uma das que apresenta melhor desempenho transversal.

Considerando a variação de temperatura na superfície moldante (Figura 84) o provete G#2 (Conformável Circular) apresenta uma diferença pouco significativa comparativamente às alternativas G#2.1 (Conformável Circular sem treliças) e G#2.2 (Conformável Circular secção constante). De entre as alternativas de canais conformáveis circulares, o que apresenta maior redução de temperatura é o G#2 – Conformável Circular, o que leva a concluir que este é o que apresenta melhor desempenho geral. À semelhança dos ensaios anteriores, as variações G#2.1 (Conformável Circular sem treliças) e G#2.2 (Conformável Circular secção constante), apresentam desempenhos semelhantes pelas mesmas razões expostas no ensaio realizado à temperatura de 500°C.

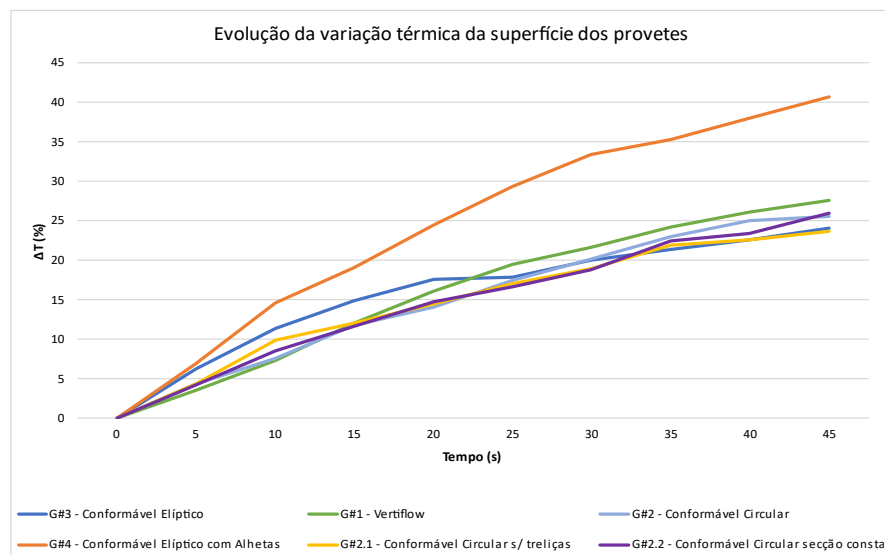


Figura 84 - Gráfico de variação térmica percentual ao longo do tempo dos vários provetes (ensaios realizados a 650°C)

4.4. Outras ponderações

Os provetes foram arrefecidos durante 45 segundos para conseguir obter resultados que permitam comparar melhor o desempenho de cada geometria. Existem outros processos

de produção de vidro, para além de embalagem, que têm tempos de produção mais longos, como é o caso dos vidros de máquinas de lavar roupa, óticos, de mesa, etc, com tempos de conformação situados num intervalo de 10 a 120 segundos correspondendo ao tempo compreendido entre a entrada de vidro no molde e a extração da peça conformada desta ferramenta. Estes processos mais longos de conformação estão geralmente relacionados com o método de prensagem e neste caso o arrefecimento das ferramentas também é necessário.

Os tempos de conformação de embalagens podem ser tão baixos como 3 ou 4 segundos no caso dos produtos de paredes finas, ou atingir tempos mais longos que podem ir até 30 segundos para o caso de contentores maiores como garrações. Geralmente estas últimas embalagens são produzidas por processos semiautomáticos, com a alimentação da gota de vidro a ser feita por um robot.

Nas Figura 85 a Figura 87 são apresentados os gráficos referentes aos primeiros 10 segundos dos ensaios experimentais que permitem pôr em evidencia o que ocorre nos processos de conformação de vidro mais rápidos. São apenas considerados os ensaios a 500°C e a 650°C por serem temperaturas aproximadas às reais durante a conformação do vidro. As Figura 85 e Figura 86 apresentam os resultados referentes aos primeiros 10 segundos de arrefecimento relativos aos ensaios realizados a 500°C. As Figura 87 e Figura 88 apresentam os primeiros 10 segundos de arrefecimentos relativos aos ensaios realizados a 650°C.

4.4.1. Ensaio realizados a 500°C

A partir da análise do gráfico da Figura 85 é possível identificar as geometrias G#3 (Conformável Elíptico) e G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) como as que apresentam maior variação térmica (cerca de 8%) e as restantes geometrias apresentam valores semelhantes neste parâmetro (cerca de 5%), sendo uma diferença pouco significativa para esta escala de tempo. Já ao nível de temperaturas, pela análise do gráfico da Figura 86, é possível identificar os provetes G#3 (Conformável Elíptico) e G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) como os que potenciam a maior redução de temperatura média na superfície moldante. Cruzando os resultados de ambos os gráficos, para esta escala de tempo, é possível concluir que a geometria G#2 – Conformável Circular apresenta maior eficiência na redução de temperatura comparativamente às

alternativas de canais conformáveis circulares G#2.1 (Conformável circular sem treliças) e G#2.2 (Conformável circular secção constante).

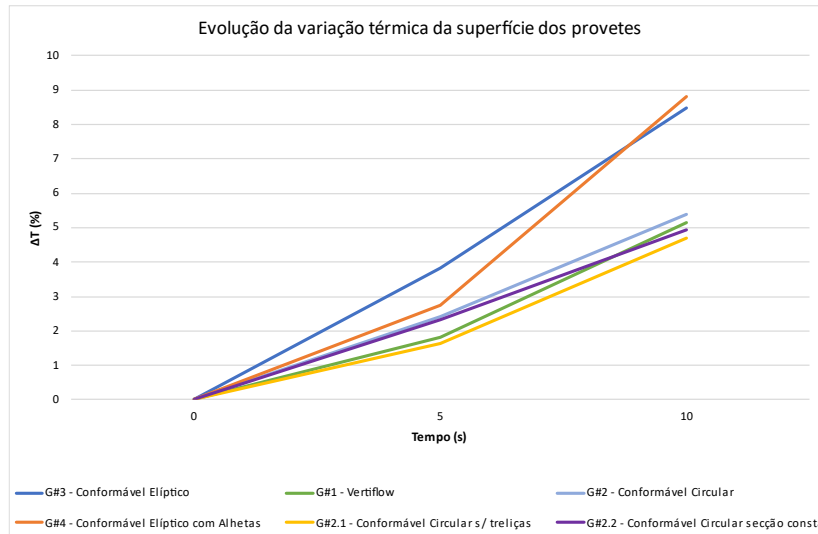


Figura 85 - Gráfico de variação térmica percentual da superfície moldante versus tempo ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaios realizados a 500°C)

O provete G#1 -Vertiflow ao fim de 10 segundos apresenta uma temperatura média na superfície moldante de 476,5°C e o provete G#2 – Conformável circular apresenta 459,3°C, já as geometrias elípticas G#3 (Conformável Elíptico) e a sua alternativa com alhetas G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) apresentam valores de temperatura média na superfície na ordem dos 450°C ao fim dos 10 segundos de arrefecimento.

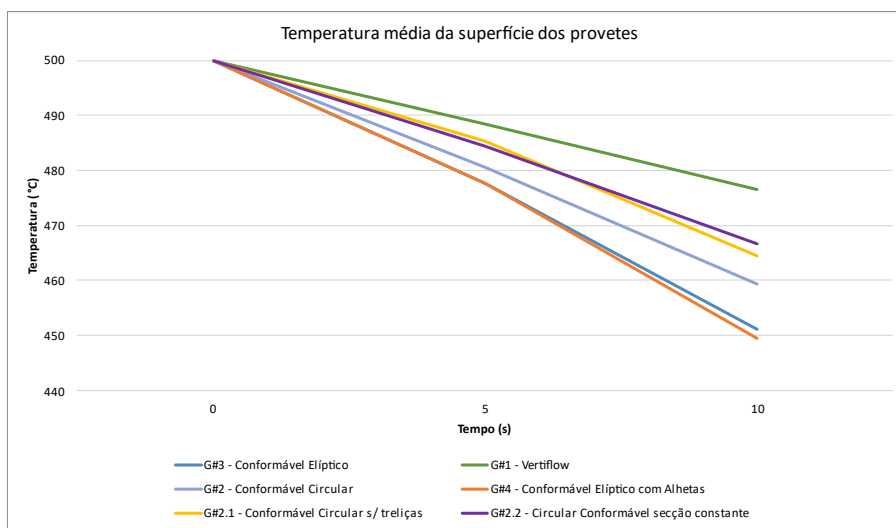


Figura 86 - Gráfico de temperatura média da superfície versus tempo dos vários provetes ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaios realizados a 500°C)

4.4.2. Ensaio realizados a 650°C

Os resultados para os primeiros 10 segundos relativos ao provete G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) não acompanham o observado como tendência para o tempo total de experimentação de 45 segundos, como demonstra o gráfico da Figura 87. É observado que o provete G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) não apresenta a maior eficiência na remoção de calor na superfície moldante, como tem sido constante pela análise das curvas de temperatura versus tempo em todos os ensaios para 45 segundos. Isto pode ser explicado pelo facto de todos os provetes iniciarem o teste a uma temperatura uniforme, neste sentido as alhetas também elas se encontram a 650°C, levando mais tempo a serem arrefecidas antes de iniciarem efetivamente a remover calor da superfície do provete. Para temperaturas mais elevadas, as alhetas demoram também mais tempo para o seu arrefecimento.

As geometrias G#3 (Conformável Elíptico) e G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) apresentam a maior variação térmica na superfície moldante e a geometria G#2 (Conformável circular) apresenta um resultado semelhante ao caso tradicional G#1 - Vertiflow neste parâmetro, como evidenciado pelo gráfico da Figura 88.

Analisando o tempo de arrefecimento de 10 segundos, a geometria G#4 não apresenta a maior redução de temperatura média na superfície do provete como observado como tendência na escala de tempo mais alargada (45 segundos) e em todas as temperaturas de testes, porém, apresenta mesmo assim uma maior variação térmica na superfície do provete. Esta observação pode ser explicada pelo facto de o tempo para arrefecimento das

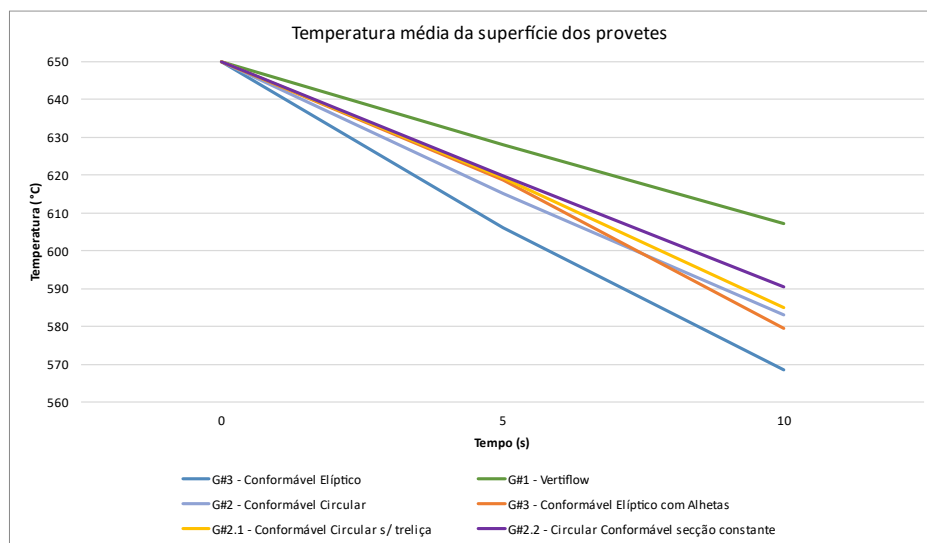


Figura 87 - Gráfico de temperatura média da superfície versus tempo dos vários provetes ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaio realizado a 650°C)

alhetas ser mais demorado, reduzindo significativamente mais temperatura no primeiro setor (alimentação de ar) do que nos restantes setores (ao meio e à saída dos canais) resultando numa elevada variação térmica da superfície do provete.

Para o tempo de arrefecimento de 10 segundos para a temperatura de 650°C, a geometria que apresenta maior eficiência é a G#3 – Conformável Elíptico, conseguindo reduzir a temperatura média da superfície moldante para aproximadamente 570°C. A segunda geometria mais eficiente para esta escala de tempo é o provete G#4 – Elíptico com alhetas, reduzindo a temperatura média da superfície moldante para próximo dos 580°C, seguido da geometria G#2 (Conformável Circular).

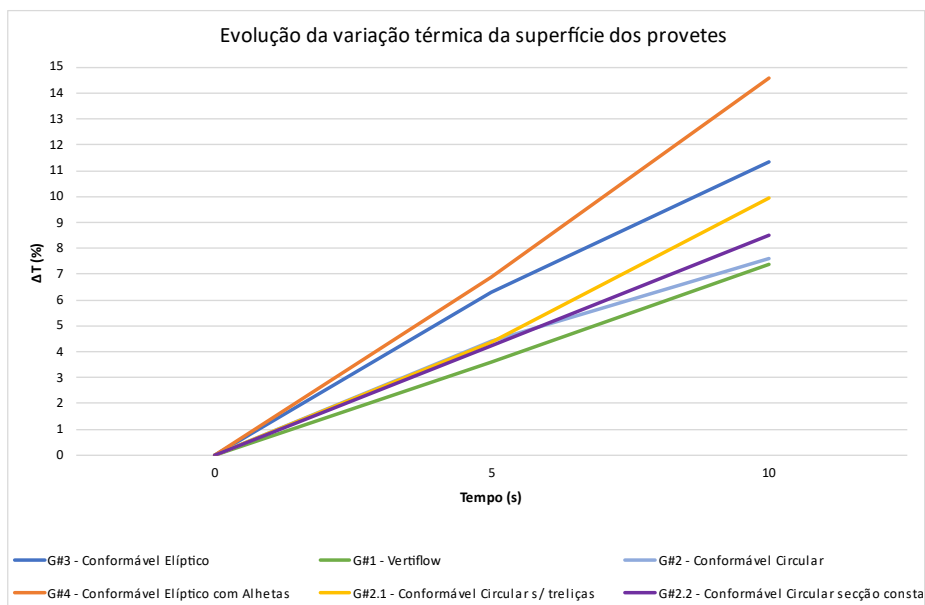


Figura 88 - Gráfico de variação térmica percentual da superfície moldante versus tempo ao longo dos primeiros 10 segundos (ensaios realizados a 650°C)

5. Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Conclusões

O presente trabalho pretende investigar os processos de conformação de vidro e de fabrico de moldes e apresentar uma solução competitiva e incrementos para melhorar o desempenho do processo de conformação de produtos em vidro com alta complexidade de forma.

É conclusão, do presente trabalho de investigação, que todas as geometrias concebidas e desenvolvidas com canais de arrefecimento conformáveis são mais eficientes no arrefecimento da superfície moldante do que o observado para o caso tradicional com tecnologia Vertiflow.

Os resultados referentes às simulações preliminares, que demonstraram a maior eficiência da alternativa Conformalflow face à tecnologia tradicional Vertiflow, foram validados com os testes realizados aos provetes representativos dos moldes. A tecnologia convencional foi a que apresentou pior eficiência no arrefecimento da superfície moldante em todos os ensaios.

Ao nível da variação térmica da superfície moldante, todas as geometrias com canais de arrefecimento conformáveis circulares tiveram melhor desempenho na redução do gradiente térmico comparando com a tecnologia Vertiflow. Isto verifica-se tanto nos primeiros 10 segundos dos ensaios, referentes a processos rápidos de conformação de vidro como é o caso da embalagem, como ao longo de 45 segundos, que corresponde a tempos mais representativos da conformação de vidro por prensagem (processos de conformação mais longos).

Os resultados evidenciam, como previsto na conceção e desenvolvimento dos provetes, que as geometrias de canais conformáveis elípticos são as mais eficientes a reduzir a temperatura da superfície moldante, comparando com as geometrias de canais conformáveis circulares. Confirma-se também que a inclusão de geometrias de arrefecimento internas no canal (G#4 – Conformável Elíptico com alhetas) potencia, de forma significativa, uma maior eficiência na redução da temperatura da superfície moldante.

Todas as geometrias com a variação de temperatura na superfície moldante inferior ao Vertiflow, indicam que podem conformar produtos em vidro com menor probabilidade de ocorrência de defeitos mecânicos. A geometria G#4 (Conformável Elíptico com alhetas) é a que demonstra maior eficiência na redução da temperatura na superfície. É também a solução que apresenta maior variação térmica, porém, para aplicação em moldes de conformação de vidro existem outros fatores e parâmetros que podem ser ajustados para mitigar o efeito do gradiente térmico sobre a qualidade dos produtos finais.

Em relação aos canais conformáveis circulares, verifica-se que a variação do diâmetro do canal de arrefecimento (provete G#2 – Conformável Circular) para acelerar o ar e evitar vórtices se mostrou efetivo para um melhor desempenho na redução da temperatura na superfície moldante comparativamente à alternativa de canais conformáveis circulares de secção constante (G#2.2). Estes resultados são mais evidentes às temperaturas de 500°C e 650°C, que corresponde aos ensaios mais importantes porque ocorrem efetivamente a temperaturas próximas da conformação do vidro.

A diferença entre o desempenho do provete G#2.1 (conformável circular sem treliças) e o desempenho do provete G#2 (conformável circular) não é muito significativa. Porém, o provete G#2 com o volume treliçado mostrou-se mais eficiente, o que implica que os canais conformáveis no caso do G#2.1 (sem treliças) têm a necessidade de arrefecer a superfície moldante e o volume maciço que se encontra à mesma temperatura inicial.

A otimização topológica deve ser aplicada aos moldes de conformação de vidro produzidos por FA. Aliar os canais conformáveis para arrefecimento a uma otimização topológica, como evidenciado no presente trabalho, permite reduzir significativamente a massa do molde. A presença de volumes treliçados para substituir maciços nas zonas estruturais do molde é essencial do ponto de vista de fabricação aditiva, porque reduz os tempos de produção, a quantidade de pó necessário para a fabricação da ferramenta e o custo da mesma.

A conceção e desenvolvimento aplicado à ponteira para alimentar o ar para arrefecimento dos canais demonstrou-se efetiva em diminuir o fluxo preferencial do ar no canal central. É possível concluir que não existiu um arrefecimento significativamente maior na zona do canal central em relação aos outros canais.

O DoE (*Design of Experiments*) concebido e desenvolvido, para realizar os testes aos provetes, provou-se efetivo, permitindo a recolha de dados e resultados para análise, discussão e para gerar conclusões no presente trabalho.

O presente trabalho de investigação conclui que o arrefecimento conformável para moldes de conformação de vidro é uma opção viável para a futura produção de embalagens de vidro com formas complexas. Estima-se que possibilite a produção de embalagens diferenciadas pela forma, com cadências de produção aceitáveis para a indústria de vidro automático, em que o maior custo da ferramenta de conformação é mitigado pelo valor acrescentado do produto final, competindo com os custos elevados, as baixas cadências e a baixa reprodutibilidade do vidro manual altamente diferenciado.

Trabalhos futuros

A conclusão do presente trabalho apresenta propostas de trabalhos futuros nesta área temática. Importante para o desenvolvimento desta área seria a realização de testes em âmbito industrial. Como já foi referido, dada a indisponibilidade das empresas para tal, é necessário futuramente desenvolver um equipamento laboratorial para testes de moldes com vidro. Este equipamento deve compreender não só uma mímica dos sistemas presentes nas máquinas IS, como também uma série de instrumentos para aquisição de dados técnico-científicos, como registo de temperaturas em vários pontos e termografia, para analisar o desempenho dos moldes.

Além dos dados de temperatura e gradientes térmicos é ainda importante conseguir analisar a qualidade final das peças produzidas. Neste mesmo equipamento, para termo de comparação, deve ser sempre feita a produção com moldes tradicionais em paralelo às produções com moldes alternativos com canais de arrefecimento otimizados por FA. Elevando o valor e utilidade do possível equipamento para o interesse das empresas produtoras de moldes, este equipamento pode ser utilizado para testar diferentes tipos e materiais de revestimento dos moldes e analisar as diferenças face às soluções convencionais, aos níveis da qualidade da embalagem, da evolução de temperaturas, assim como do desgaste dos vários materiais dos moldes alvos de testes.

6. Referências Bibliográficas

- [1] S. Feng, A. M. Kamat, and Y. Pei, “Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 171, p. 121082, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121082.
- [2] Portal da Marinha Grande, “Cluster vidro, moldes, plásticos”, Accessed: May 23, 2019. [Online]. Available: <https://www.cm-mgrande.pt/pages/295>
- [3] J. Manoel, “Análise de Processos Fabris na BA Vidro,” p. 55, 2010.
- [4] M. Hyre, “Numerical simulation of glass forming and conditioning,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 85, no. 5, pp. 1047–1056, 2002, doi: 10.1111/j.1151-2916.2002.tb00221.x.
- [5] Hoenig et al. ; O.-I. Inc., “Glass forming machine blank mold cooling apparatus,” *US Patent 5,900,035*, Aug. 1997, Accessed: Jun. 25, 2019. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US5900035A/ar>
- [6] Heetfield D. O.-I. glass container Inc., “Nickel base alloy glass shaping member,” *US Patent 4,814,024*, 1989, Accessed: Jun. 25, 2019. [Online]. Available: <http://www.freepatentsonline.com/4814024.pdf>
- [7] A. J. Eisenberg, “Method and apparatus for forming glass parisons - US 2,688,823,” *J Acoust Soc Am*, vol. 77, no. 6, pp. 2208–2208, Nov. 2005, doi: 10.1121/1.391691.
- [8] M. Kovačec, A. Pilipović, and N. Štefanić, “Improving the quality of glass containers production with plunger process control,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 3, no. 4, pp. 304–310, 2010, doi: 10.1016/j.cirpj.2011.02.003.
- [9] W. Hu, W. Slusser, P. de Haan, and G. Smay, “Using NNPB forming technology for refillable beer bottles”, Accessed: Jan. 26, 2022. [Online]. Available: www.glassworldwide.co.uk
- [10] M. Hyre, “Mould cooling strategies,” *Glass*, pp. 76–79, 2007, Accessed: May 07, 2019. [Online]. Available: <http://old.emhartglass.com/files/A0096.pdf>

- [11] Heye International GmbH, “Product guide standard variables” Accessed: May 07, 2019. [Online]. Available: <https://www.hey-international.com/hiperform-hot-end/variables-parts>.
- [12] Heye International GmbH, “Full Cycle Blank and Blow Mould Axial Cooling.” <https://www.hey-international.com/hiperform-hot-end/is-machines-equipment/axial-cooling> (accessed Sep. 21, 2022).
- [13] Heye industries, “HiPERFORM-EXCELLENCE IN FORMING.” Accessed: Jun. 21, 2019. [Online]. Available: https://www.hey-international.com/fileadmin/user_upload/Bilder/1_HiPERFORM/1_Smart_Plant/Smart_Book.pdf
- [14] Heye International GmbH, “Full cycle cooling for high speed production from Heye,” https://www.hey-international.com/fileadmin/user_upload/Bilder/1_HiPERFORM/5_Variables_Parts/17_11_Glass_International_360__Cooling.pdf, Nov. 2017.
- [15] S. A. Jahan *et al.*, “Implementation of Conformal Cooling & Topology Optimization in 3D Printed Stainless Steel Porous Structure Injection Molds,” *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 901–915, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.077.
- [16] G. R. Berger, D. Zorn, W. Friesenbichler, F. Bevc, and C. J. Bodor, “Efficient cooling of hot spots in injection molding. A biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics,” *Polym Eng Sci*, vol. 59, no. s2, pp. E180–E188, Mar. 2019, doi: 10.1002/PEN.25024.
- [17] P. Freitas, C. Santos, P. Carreira, and A. Mateus, “High Efficiency Cooling and Heating Channels for Injection Moulding,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 890, pp. 43–53, Apr. 2019, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.890.43.
- [18] R. Roy and B. Kundu, “Effects of fin shapes on heat transfer in microchannel heat sinks,” *Heat Transfer—Asian Research*, vol. 47, no. 4, pp. 646–659, Jun. 2018, doi: 10.1002/HTJ.21332.
- [19] P. Hanzl, I. Zetková, and M. Daňa, “A comparison of lattice structures in metal additive manufacturing,” *Annals of DAAAM and Proceedings of the International*

- DAAAM Symposium*, pp. 481–485, 2017, doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.067.
- [20] A. Gens and D. M. Potts, “Engineering Computations,” vol. 6, no. 4, pp. 5–6, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1108/eb023774>.
- [21] L. H. Liu *et al.*, “Abnormal increase of glass forming ability under rising mold temperature in high pressure die casting,” *Mater Lett*, vol. 247, pp. 215–218, 2019, doi: 10.1016/j.matlet.2019.03.127.
- [22] P. B. Ryzhakov, J. García, and E. Oñate, “Lagrangian finite element model for the 3D simulation of glass forming processes,” *Comput Struct*, vol. 177, pp. 126–140, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.compstruc.2016.09.007.
- [23] B. Martins, M. Machado, A. Reis, and J. M. A. César de Sá, “Coupled thermomechanical model for press and blow forming processes of glass containers,” 2017. Accessed: Jun. 17, 2019. [Online]. Available: <http://www.inegi.up.pthttp://www.fe.up.pt>
- [24] R. Kent, “Mould Temperature and Heat Flux Measurements and the Control of Heat Transfer During the Production of Glass Containers,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 6, no. 5, pp. 20–29, 1973, doi: 10.1016/S1474-6670(17)67922-9.
- [25] Y. C. Tsai, C. Hung, and J. C. Hung, “Glass material model for the forming stage of the glass molding process,” *J Mater Process Technol*, vol. 201, no. 1–3, pp. 751–754, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.294.
- [26] P. Manns, W. Döll, and G. Kleer, “Glass in contact with mould materials for container production,” *Glass Science and Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 389–399, 1995.
- [27] G. Dusserre, G. Dour, and G. Bernhart, “In-situ determination of the heat flux density at the glass/mould interface during a glass pressing production cycle,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 2, pp. 428–439, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.010.
- [28] Pinto Soares, *Aços para Fermentas*. 2009.
- [29] S. I. Sil’vestrovich and V. P. Khramkov, “Mold materials for glass production,” *Glass and Ceramics*, vol. 29, no. 7, pp. 440–442, 1972, doi: 10.1007/BF00674533.

- [30] L. Y. Chen, S. X. Liang, Y. Liu, and L. C. Zhang, “Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 146, p. 100648, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.MSER.2021.100648.
- [31] J. Yan, T. Zhou, J. Masuda, and T. Kuriyagawa, “Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis,” *Precis Eng*, vol. 33, no. 2, pp. 150–159, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.precisioneng.2008.05.005.
- [32] Peter Manns, Walter Doll, and Gunter Kleer, “Glass in contact with mould materials for container production,” *Glass Science and Technology: Glastechnische Berichte*, 1995, Accessed: Mar. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/287660504_Glass_in_contact_with_mould_materials_for_container_production
- [33] “Technical Data FLIR A655sc 25 - Tester.co.uk | Manualzz.” https://manualzz.com/doc/43493229/technical-data-flir-a655sc-25---tester.co.uk?__cf_chl_f_tk=9yJ5m5FGc.Y2hkx4KNWhjoZUr0hBVOQDP0HHR EldOBM-1642160828-0-gaNycGzNB1E (accessed Jan. 17, 2022).

7. Anexo A

Tabelas de resultados

As seguintes tabelas apresentam os resultados e as medições de temperatura retiradas dos vídeos filmados com camara termográfica para cada um dos provetes.

7.1. Ensaios realizados a 200°C

Da Tabela 14 a Tabela 18 são apresentados os resultados retirados da análise termográfica dada pelos ensaios realizados a 200°C

Tabela 14 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#1 – Vertiflow (ensaio 200°C)

G#1 - Vertiflow, Range 100-600°C, Temperatura inicial 200°C										
timestep	Alimentação			Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
	200	200	200		200	200	200	200	200	200
0	200	200	200	0	200	200	200	200	200	200
5	190,25	198,5	197,4	4,156171	193,5	187	198,2	198,8	197,1	197,7
10	181,65	197,05	195,2	7,815275	186,3	177	196,3	197,8	193	197,4
15	170,95	194,95	191,9	10,91714	176	165,9	193,6	196,3	188,4	195,4
20	159,05	193,45	188,35	15,55615	165,2	152,9	191,3	195,6	182,5	194,2
25	149,6	188,55	187,8	20,34079	155,9	143,3	187	190,1	183,9	191,7
30	140,15	184,2	184,7	24,12019	146,5	133,8	181,9	186,5	180,9	188,5
35	131,9	180,1	182,35	27,66658	138,2	125,6	177,4	182,8	179,2	185,5
40	125,5	175,95	178,65	29,75091	131,8	119,2	173	178,9	175,8	181,5
45	121,1	171,1	175,8	31,1149	126,8	115,4	167,9	174,3	172,5	179,1
Redução d	-39%	-14%	-12%							
Variação temp		-31%								

Tabela 13 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2 - Conformável Circular (ensaio 200°C)

G#2 - Conformável Circular, Range 100-600°C, Temperatura inicial 200°C										
timestep	Alimentação			Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
	200	200	200		200	200	200	200	200	200
0	200	200	200	0	200	200	200	200	200	200
5	187,5	196,75	193,65	4,701398	187,7	187,3	196,7	196,8	191,9	195,4
10	174,95	192,15	186,45	6,167873	175,1	174,8	192,3	192	184	188,9
15	163,7	185,85	179,65	11,91821	164,6	162,8	186	185,7	177,3	182
20	153,85	179,35	173,5	14,21801	154,8	152,9	179,7	179	171	176
25	144,5	172,25	167,05	16,1103	145,8	143,2	172,8	171,7	164,5	169,6
30	136	165,35	160,85	17,75023	137,5	134,5	166,1	164,6	158,4	163,3
35	127,55	158,15	154,75	19,34872	128,5	126,6	158,7	157,6	152,6	156,9
40	120	150,85	148,35	20,45078	121,1	118,9	151,6	150,1	146,1	150,6
45	113,95	144,65	143,35	21,22364	114,8	113,1	145,1	144,2	141,1	145,6
Redução d	-43%	-28%	-28%							
Variação temp		-21%								

Tabela 15 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.1 - Conformável Circular sem treliças (ensaio 200°C)

G#2.1 - Conformável Circular Sem Treliças, Range 100-600°C, Temperatura inicial 200°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Variação térmica por timestep	Alimentação	Centro	Saída			
0	200	200	200	0	200	200	200	200	200	200
5	192,4	195,1	193,8	1,383905689	192,2	192,6	194,8	195,4	192	195,6
10	178,7	188,75	187,95	5,324503311	179,1	178,3	188,3	189,2	186,8	189,1
15	164,8	182,25	182,7	9,574759945	167,2	162,4	181,7	182,8	183	182,4
20	151,85	173,9	175,55	12,67970098	155,1	148,6	173	174,8	176,3	174,8
25	140,95	166,4	168,5	15,29447115	144,2	137,7	165,7	167,1	169,4	167,6
30	134,2	159,5	160,95	15,86206897	136,1	132,3	159,3	159,7	160,7	161,2
35	126,7	153,25	155,4	17,32463295	128,7	124,7	153,4	153,1	155,7	155,1
40	119,8	146,5	149,55	18,22525597	121,7	117,9	146,8	146,2	150	149,1
45	115,55	140,7	145,5	17,87491116	115,5	115,6	141	140,4	146,4	144,6
Redução de temp	-42%	-30%	-27%							
Variação temp		-21%								

Tabela 16 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.2 - Conformável Circular secção constante (ensaio 200°C)

G#2.2 - Conformável Circular secção constante, Range 100-600°C, Temperatura inicial 200°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Variação térmica por timestep	Alimentação	Centro	Saída			
0	200	200	200	0	200	200	200	200	200	200
5	192,25	196,6	195,95	2,212614446	192,6	191,9	195,5	197,7	195,4	196,5
10	181,4	191,2	188,75	5,125523013	182,2	180,6	190,7	191,7	189	188,5
15	168,3	184,4	182,15	8,731019523	169,4	167,2	184,1	184,7	182,4	181,9
20	156,75	177,15	176,05	11,51566469	158,1	155,4	177,2	177,1	176,5	175,6
25	147,3	170,3	170,5	13,60703812	148,7	145,9	170,5	170,1	171	170
30	138,15	162,75	164,55	16,0437557	139,5	136,8	163,2	162,3	165,1	164
35	130,7	156,1	158,75	17,66929134	132,6	128,8	156,4	155,8	159,7	157,8
40	123,6	149,5	153,3	19,37377691	125,5	121,7	149,8	149,2	154,2	152,4
45	116,9	142,55	146,25	20,06837607	119,7	114,1	143,6	141,5	147,1	145,4
Redução de temp	-42%	-29%	-27%							
Variação temp		-20%								

Tabela 17 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#3 – Conformável Elíptico (ensaio 200°C)

G#3 - Elíptico simples, Range 100-600°C, Temperatura inicial 200°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Variação térmica por timestep	Alimentação	Centro	Saída			
0	200	200	200	0	200	200	200	200	200	200
5	184,85	195	195,25	5,205128	184,1	185,6	194,7	195,3	195,1	195,4
10	168,65	188	188,25	10,29255	167,4	169,9	188,3	187,7	188	188,5
15	155,55	180,9	182,45	14,01327	154,9	156,2	181,4	180,4	182,2	182,7
20	143,2	172,55	175,4	17,00956	142,7	143,7	173,2	171,9	174,9	175,9
25	132,75	164,05	168,95	19,07955	132,5	133	164,6	163,5	168,9	169
30	122,4	155,4	161,7	21,23552	122,3	122,5	156,2	154,6	161,3	162,1
35	113,5	147,1	155,1	22,8416	113,5	113,5	148	146,2	155	155,2
40	104,65	138,7	147,75	24,54939	104,4	104,9	139,6	137,8	147,5	148
45	97,15	131,45	142,35	26,09357	96,3	98	132,8	130,1	142,4	142,3
Redução d	-51%	-34%	-29%							
Variação temp		-32%								

Tabela 19 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas (ensaio 200°C)

G#4 - Elíptico com alhetas, Range 100-600°C, Temperatura inicial 200°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	200	200	200	0	200	200	200	200	200	200
5	183,7	195,5	193,1	4,867944	183,6	183,8	194,8	196,2	191,4	194,8
10	164,6	187,15	186,6	11,78992	164,3	164,9	186,5	187,8	183,3	189,9
15	147,15	176,75	178,45	17,53993	147,1	147,2	176,5	177	174	182,9
20	132,5	166	170,75	22,40117	132,5	132,5	166,5	165,5	166	175,5
25	120,6	156,3	160,5	24,85981	120,5	120,7	156,9	155,7	158,2	162,8
30	110,1	146,5	152,25	27,68473	110	110,2	147,6	145,4	150,2	154,3
35	101,3	137,4	145,1	30,18608	101,4	101,2	138,5	136,3	142,9	147,3
40	93,35	128,55	136,85	31,78663	93	93,7	129,7	127,4	134,7	139
45	85,65	120,55	129,5	33,861	85,3	86	121,5	119,6	127,6	131,4
Redução d	-57%	-40%	-35%							
Variação temp		-34%								

Tabela 18 - Valores de temperatura média da superfície (ensaio 200°C)

timestep	G#1 Vertiflow	G#2 Conformal Circular	G#3 Elíptico	G#4 - Elíptico com Alhetas	G#2.1 Circular sem treliças	G#2.2 - Circular secção constante
0	200	200	200	200	200	200
5	195,3833	192,6333	191,7	190,7667	193,7667	194,9333
10	191,3	184,5167	181,6333	179,45	185,1333	187,1167
15	185,9333	176,4	172,9667	167,45	176,5833	178,2833
20	180,2833	168,9	163,7167	156,4167	167,1	169,9833
25	175,3167	161,2667	155,25	145,8	158,6167	162,7
30	169,6833	154,0667	146,5	136,2833	151,55	155,15
35	164,7833	146,8167	138,5667	127,9333	145,1167	148,5167
40	160,0333	139,7333	130,3667	119,5833	138,6167	142,1333
45	156	133,9833	123,65	111,9	133,9167	135,2333
Redução de temp (média)	-22%	-33%	-38%	-44%	-33%	-32%

7.2. Ensaio realizado a 500°C

À semelhança do subcapítulo anterior dos ensaios a 200°C, da Tabela 20 a Tabela 26 são apresentados os resultados retirados da análise termográfica dada pelos ensaios realizados a 500°C.

Tabela 20 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#1 – Vertiflow (ensaio 500°C)

Vertiflow, Range 100-600°C, Temperatura inicial 500°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Varição térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500
5	483,2	492,15	489,85	1,818551	483	483,4	493,3	491	487,9	491,8
10	461,9	487,05	480,6	5,163741	468,8	455	488	486,1	476,9	484,3
15	433,45	478,95	472,45	8,254842	443,6	423,3	481,4	476,5	468,7	476,2
20	407,85	469,35	464,85	12,26202	418,8	396,9	473,3	465,4	461,4	468,3
25	380,05	457,3	457,45	16,91988	388,9	371,2	462,2	452,4	454,3	460,6
30	357,6	444,75	449,25	20,40067	366,7	348,5	449,8	439,7	446,7	451,8
35	338,9	433,3	440,6	23,08216	349,6	328,2	438,7	427,9	438,4	442,8
40	323,05	421,25	431,4	25,1159	335	311,1	427,4	415,1	429,1	433,7
45	310,95	412,35	423,1	26,50674	323,5	298,4	421,7	403	421,4	424,8
Redução de	-38%	-18%	-15%							
Varição temp		-27%								

Tabela 21 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2 – Conformável Circular (ensaio 500°C)

Conformável Circular, Range 100-600°C, Temperatura inicial 500°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Varição térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500
5	474,2	485,9	481,8	2,407903	473,1	475,3	484,5	487,3	478,7	484,9
10	444,35	469,65	463,9	5,38699	443	445,7	469,4	469,9	460,5	467,3
15	415,85	451,05	445,75	7,804013	414,5	417,2	451,7	450,4	442,4	449,1
20	389,9	431,25	428,2	9,588406	388,8	391	432,2	430,3	425	431,4
25	366,3	410,95	411,15	10,90843	365,1	367,5	411,6	410,3	408	414,3
30	344,6	391,15	393,9	12,51587	342,5	346,7	391,8	390,5	390,9	396,9
35	325,15	372,7	378,25	14,03833	323,3	327	373,3	372,1	374,9	381,6
40	305,8	354,75	362,65	15,67627	303,9	307,7	356,3	353,2	359,7	365,6
45	289,5	337,65	348,1	16,83424	288,5	290,5	339,1	336,2	345,3	350,9
Redução de	-42%	-32%	-30%							
Varição temp		-17%								

Tabela 22 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.1 – Conformável Circular sem treliças (ensaio 500°C)

Conformável Circular Sem Treliças, Range 100-600°C, Temperatura inicial 500°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Varição térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500
5	479,5	487,4	489,2	1,620845302	475,4	483,6	486,8	488	491,4	487
10	450,35	472,55	470,75	4,697915564	445,1	455,6	473	472,1	472,2	469,3
15	421	457,45	455,55	7,968083944	413,9	428,1	458,6	456,3	458,7	452,4
20	397,1	441,2	438,2	9,995466908	391,7	402,5	442,1	440,3	440,2	436,2
25	374	424,8	422,15	11,95856874	367,8	380,2	425,7	423,9	423,5	420,8
30	351,8	409,45	408,25	14,07986323	344,1	359,5	410,3	408,6	409,8	406,7
35	331,45	393,5	395,25	16,14168248	323,8	339,1	395,4	391,6	396,4	394,1
40	313,85	378	382,25	17,8940484	306,6	321,1	381	375	383,5	381
45	295,7	362,45	372,4	20,59613319	288,4	303	366,1	358,8	375,1	369,7
Redução de temp	-41%	-28%	-26%							
Varição temp		-21%								

Tabela 24 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.2 – Conformável Circular secção constante (ensaio 500°C)

Conformável Circular secção constante, Range 100-600°C, Temperatura inicial 500°C

timestep	Alimentação		Centro		Saída		Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500
5	478,9	490,25	483,95	483,95	2,315145334	484,2	473,6	490,6	489,9	483,5	484,4	483,5	484,4
10	453,75	477,3	469,15	4,934003771	462	445,5	478,2	476,4	468,8	469,5	469,5	468,8	469,5
15	427,55	461,75	454,3	7,406605306	437,4	417,7	463,9	459,6	454,3	454,3	454,3	454,3	454,3
20	403,25	444,4	439,7	9,259675968	414,2	392,3	447,6	441,2	440,5	438,9	438,9	440,5	438,9
25	382,6	428,15	426,35	10,63879481	393,2	372	431,4	424,9	427	425,7	425,7	427	425,7
30	362,25	411,05	411,9	12,05389658	372,3	352,2	414,6	407,5	412,8	411	411	412,8	411
35	343,1	394,3	398,45	13,8913289	352,9	333,3	398,1	390,5	399,5	397,4	397,4	399,5	397,4
40	325,5	378,35	385,25	15,50940947	335	316	382,3	374,4	386,3	384,2	384,2	386,3	384,2
45	312,5	365,85	374,2	16,48850882	322	303	369,8	361,9	375,2	373,2	373,2	375,2	373,2
Redução de temp	-38%	-27%	-25%										
Variação temp		-16%											

Tabela 23 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#3 – Conformável Elíptico (ensaio 500°C)

Elíptico simples, Range 100-600°C, Temperatura inicial 500°C

timestep	Alimentação		Centro		Saída		Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500
5	464,1	486,1	482,5	3,813472	468	460,2	486,7	485,5	480,4	484,6	484,6	480,4	484,6
10	424,75	464,55	464,15	8,488635	428,5	421	464,8	464,3	462	466,3	466,3	462	466,3
15	390,45	441,6	445,1	12,27814	394,7	386,2	442,1	441,1	443,9	446,3	446,3	443,9	446,3
20	360,15	418,2	427,7	15,79378	363,9	356,4	420,1	416,3	426,9	428,5	428,5	426,9	428,5
25	333,9	396,15	408,1	18,18182	340,1	327,7	399,2	393,1	408,5	407,7	407,7	408,5	407,7
30	308,1	373,95	389,35	20,86811	314	302,2	376,6	371,3	390,1	388,6	388,6	390,1	388,6
35	285,95	352,8	372,5	23,2349	291,3	280,6	356,4	349,2	373,2	371,8	371,8	373,2	371,8
40	267	333,25	355,4	24,87338	272,4	261,6	337,2	329,3	356,1	354,7	354,7	356,1	354,7
45	249,5	315,1	339,6	26,53121	254,6	244,4	319,7	310,5	340,1	339,1	339,1	340,1	339,1
Redução de temp	-50%	-37%	-32%										
Variação temp		-27%											

Tabela 25 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas (ensaio 500°C)

Elíptico com alhetas, Range 100-600°C, Temperatura inicial 500°C

timestep	Alimentação		Centro		Saída		Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500
5	467,25	485,05	480,4	2,737302	466,4	468,1	482,4	487,7	477,2	483,6	483,6	477,2	483,6
10	421,2	465,2	461,9	8,811431	420,3	422,1	461,9	468,5	458,3	465,5	465,5	458,3	465,5
15	380,9	442,5	444,2	14,25034	381,3	380,5	439,6	445,4	440,7	447,7	447,7	440,7	447,7
20	339,05	412,35	423,4	19,92206	343,6	334,5	411,7	413	420,7	426,1	426,1	420,7	426,1
25	303,2	384,85	403	24,76427	309,4	297	384,8	384,9	401	405	405	401	405
30	271,8	358,7	382,7	28,97831	278,5	265,1	359,5	357,9	380,8	384,6	384,6	380,8	384,6
35	247,85	335,85	364,35	31,97475	255,6	240,1	337,5	334,2	362,9	365,8	365,8	362,9	365,8
40	227,2	315,05	342,55	33,67392	234,9	219,5	317	313,1	342	343,1	343,1	342	343,1
45	210,05	298,35	323,4	35,04947	217,3	202,8	297,6	299,1	323,2	323,6	323,6	323,2	323,6
Redução de temp	-58%	-40%	-35%										
Variação temp		-35%											

Tabela 26 - Valores de temperatura média da superfície (ensaios 500°C)

timestep	G#1 Vertiflow	G#2 Conformal Circular	G#3 Elíptico	G#4 - Elíptico com Alhetas	G#2.1 Circular sem treliças	G#2.2 - Circular secção constante
0	500	500	500	500	500	500
5	488,4	480,6333	477,5667	477,5667	485,3667	484,3667
10	476,5167	459,3	451,15	449,4333	464,55	466,7333
15	461,6167	437,55	425,7167	422,5333	444,6667	447,8667
20	447,35	416,45	402,0167	391,6	425,5	429,1167
25	431,6	396,1333	379,3833	363,6833	406,9833	412,3667
30	417,2	376,55	357,1333	337,7333	389,8333	395,0667
35	404,2667	358,7	337,0833	316,0167	373,4	378,6167
40	391,9	341,0667	318,55	294,9333	358,0333	363,0333
45	382,1333	325,0833	301,4	277,2667	343,5167	350,85
Redução de temp (média)	-24%	-35%	-40%	-45%	-31%	-30%

7.3. Ensaios realizados a 650°C

À semelhança dos subcapítulos anteriores dos ensaios a 200°C e 500°C, da Tabela 27 a Tabela 33 são apresentados os resultados retirados da análise termográfica dada pelos ensaios realizados a 650°C.

Tabela 27 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#1 – Vertiflow (ensaios 650°C)

Vertiflow, Range 100-650°C, Temperatura inicial 650°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Varição térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	650	650	650	0	650	650	650	650	650	650
5	613,1	636	635,35	3,600629	608,5	617,7	635,9	636,1	638	632,7
10	577,3	620,7	623,4	7,394931	574,2	580,4	620,4	621	625,2	621,6
15	537,5	600,9	611,45	12,0942	534,1	540,9	601,8	600	614,9	608
20	504	580,4	601,2	16,16766	501	507	579,8	581	605,8	596,6
25	472,2	560,65	586,65	19,50908	467,3	477,1	559,6	561,7	589,9	583,4
30	451,5	539,45	576,3	21,65539	447,8	455,2	538,4	540,5	578,6	574
35	425,85	519,85	561,9	24,21249	421,3	430,4	519,7	520	563,4	560,4
40	406,15	500,8	549,75	26,12096	400,6	411,7	500,3	501,3	553	546,5
45	389,45	482,8	537,65	27,5644	383,9	395	480,4	485,2	540,7	534,6
Redução de	-40%	-26%	-17%							
Varição temp		-28%								

Tabela 28 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2 – Conformável Circular (ensaio 650°C)

Conformável Circular, Range 100-650°C, Temperatura inicial 650°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Varição térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	650	650	650	0	650	650	650	650	650	650
5	603,1	630,8	611,65	4,391249	607,5	598,7	629,9	631,7	609,6	613,7
10	548,55	607,5	593,65	7,597069	550,9	546,2	605,4	609,6	592,5	594,8
15	514,9	583,7	573,9	11,78688	517,6	512,2	583,2	584,2	572,3	575,5
20	479,35	558,15	553,3	14,11807	482	476,7	558,6	557,7	551,9	554,7
25	439,25	532,05	529,2	17,44197	440,6	437,9	535,4	528,7	527	531,4
30	403,55	503	505,85	20,22339	403,9	403,2	502,4	503,6	504,3	507,4
35	372,05	476,25	482,95	22,96304	371,6	372,5	474,5	478	481,4	484,5
40	344,6	451	460,1	25,10324	343,3	345,9	448,6	453,4	458,5	461,7
45	327,85	429,2	440,6	25,5901	327,1	328,6	429,3	429,1	438,1	443,1
Redução de temp	-50%	-34%	-32%							
Varição temp		-26%								

Tabela 29 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.1 – Conformável Circular sem treliças (ensaio 650°C)

Conformável Circular Sem Trelças, Range 100-650°C, Temperatura inicial 650°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Varição térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	650	650	650	0	650	650	650	650	650	650
5	604,05	631,7	621,8	4,37707727	601,9	606,2	633,4	630	618,7	624,9
10	549,45	610,2	595,3	9,955752212	550,3	548,6	612,2	608,2	591,3	599,3
15	516	586,55	571,45	12,02796011	511,5	520,5	591,4	581,7	569,8	573,1
20	483,8	565,95	551,3	14,51541656	479,7	487,9	567,7	564,2	546,2	556,4
25	450,4	542,7	529,5	17,00755482	445,7	455,1	542,4	543	522,9	536,1
30	420,65	519,4	508,35	19,01232191	415,4	425,9	518,9	519,9	502,1	514,6
35	386,45	494,8	487,25	21,89773646	378,9	394	493,7	495,9	480,2	494,3
40	366,25	473,25	469,1	22,60961437	356,6	375,9	472,9	473,6	462,7	475,5
45	345,4	452,5	451,4	23,66850829	342,2	348,6	451,5	453,5	445	457,8
Redução de temp	-47%	-30%	-31%							
Varição temp		-23%								

Tabela 30 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#2.2 – Conformável Circular secção constante (ensaio 650°C)

Conformável Circular secção constante, Range 100-650°C, Temperatura inicial 650°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Varição térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	650	650	650	0	650	650	650	650	650	650
5	603,05	629,65	626,85	4,224569205	604,6	601,5	629,6	629,7	626,1	627,6
10	556,35	607,15	608,15	8,517635452	557,3	555,4	611,6	602,7	606,7	609,6
15	519,8	582,5	588,5	11,67374681	520	519,6	588,2	576,8	585,8	591,2
20	483,8	558,25	568,05	14,83144089	484,8	482,8	566,2	550,3	566,7	569,4
25	454,95	535,25	545,8	16,64529132	457,2	452,7	541,9	528,6	543	548,6
30	425,5	512,6	523,8	18,76670485	428,8	422,2	516,3	508,9	524,9	522,7
35	389,45	490,8	501,95	22,4125909	391,6	387,3	493,5	488,1	501,3	502,6
40	367,55	470,15	479,8	23,39516465	366,6	368,5	472,2	468,1	477,5	482,1
45	339,05	451,15	458,5	26,0523446	337,8	340,3	452,8	449,5	455,3	461,7
Redução de temp	-48%	-31%	-29%							
Varição temp		-26%								

Tabela 32 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#3 – Conformável Elíptico (ensaio 650°C)

Elíptico simples, Range 100-650°C, Temperatura inicial 650°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	650	650	650	0	650	650	650	650	650	650
5	583	622,2	613,1	6,300225	581,9	584,1	618,1	626,3	613,2	613
10	527,1	594,6	583,65	11,35217	525,9	528,3	589,3	599,9	583,4	583,9
15	479	563,2	553,65	14,95028	477,9	480,1	557,1	569,3	554,1	553,2
20	439,8	533,65	525,95	17,58643	438,6	441	527,9	539,4	525,3	526,6
25	414,85	504,85	505,65	17,82708	410,4	419,3	501,1	508,6	507,4	503,9
30	386,4	482,9	469,3	19,98343	386	386,8	481	484,8	470,9	467,7
35	360,2	458,1	443,65	21,37088	359,8	360,6	456,9	459,3	445,8	441,5
40	335,2	432,8	427,85	22,55083	334,6	335,8	431,7	433,9	429,4	426,3
45	311,35	410,4	407,2	24,13499	310,4	312,3	409,5	411,3	409,2	405,2
Redução de	-52%	-37%	-37%							
Variação temp		-24%								

Tabela 31 - Tabela de dados do ensaio ao provete G#4 – Conformável Elíptico com Alhetas (ensaio 650°C)

Elíptico com alhetas, Range 100-650°C, Temperatura inicial 650°C										
timestep	Alimentação	Centro	Saída	Variação térmica por timestep	Alimentação		Centro		Saída	
0	650	650	650	0	650	650	650	650	650	650
5	590,35	631,5	634,1	6,899543	595	585,7	627,8	635,2	628,3	639,9
10	523,75	602,2	613,05	14,56651	531,4	516,1	597,2	607,2	603,5	622,6
15	467,45	564,25	578,05	19,13329	475	459,9	561,2	567,3	568,2	587,9
20	417,55	527,15	552,95	24,48684	426,8	408,3	525,1	529,2	541,1	564,8
25	371,25	490,55	526	29,42015	380,4	362,1	488	493,1	513,5	538,5
30	332,9	454,35	500,15	33,43997	342,1	323,7	452,1	456,6	487,1	513,2
35	303,4	422,85	469,5	35,37806	311,5	295,3	422,3	423,4	459,8	479,2
40	277,25	392,75	447,7	38,07237	286,4	268,1	393	392,5	439,4	456
45	253,3	364,35	427,65	40,76932	263,4	243,2	365,7	363	415,6	439,7
Redução de	-61%	-44%	-34%							
Variação temp		-41%								

Tabela 33 - Valores de temperatura média da superfície (ensaio 650°C)

timestep	G#1 Vertiflow	G#2 Conformal Circular	G#3 Elíptico	G#4 - Elíptico com Alhetas	G#2.1 Circular sem treliças	G#2.2 - Circular secção constante
0	650	650	650	650	650	650
5	628,15	615,1833	606,1	618,65	620,5167	621,6833
10	607,1333	583,2333	568,45	579,6667	588,3167	595,8833
15	583,2833	557,5	531,95	536,5833	558,1667	568,2667
20	561,8667	530,2667	499,8	499,2167	535,35	541,3667
25	539,8333	500,1667	475,1167	462,6	509,2	516,3333
30	522,4167	470,8	446,2	429,1333	484,4667	492,4667
35	502,5333	443,75	420,65	398,5833	460,3333	469,4
40	485,5667	418,5667	398,6167	372,5667	439,5333	447,5
45	469,9667	399,2167	376,3167	348,4333	419,7667	426,4
Redução de temp (média)	-28%	-39%	-42%	-46%	-35%	-34%