



# **Simulação e validação experimental do sistema de gitagem e de alimentação numa flange de liga A356.0**

**RICARDO JORGE SAMPAIO DA COSTA**  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA  
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

**ORIENTADOR:**  
PROFESSOR DOUTOR CARLOS ALBERTO SILVA RIBEIRO

PORTO, 13 DE OUTUBRO DE 2021

<b>CANDIDATO</b>	Ricardo Jorge Sampaio da Costa	<b>Código</b> 201304538
<b>TÍTULO</b>	Simulação e validação experimental do sistema de gitagem e de alimentação numa flange de liga A356.0	
<b>DATA</b>	28 de Outubro de 2021	
<b>LOCAL</b>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Videoconferência - 16:45h	
<b>JÚRI</b>	<i>Presidente</i> Doutor Manuel Fernando Gonçalves Vieira, Professor Associado	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i> Doutor Rui Ricardo Loureiro Amaral, Investigador	INEGI
	<i>Orientador</i> Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro, Professor Associado	DEMM/FEUP



## AGRADECIMENTOS

---

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à FIRMAGO pela enorme oportunidade de trabalhar e realizar a minha dissertação de mestrado em ambiente empresarial. Sempre se apresentaram disponíveis para me ajudar e orientar no que fosse necessário, sentindo-me assim muito bem recebido e integrado desde o primeiro dia. Um especial obrigado ao Eng. Sérgio Cruz por todos os ensinamentos, exemplo e sobretudo pela amizade e companheirismo. Um muito obrigado também ao Eng. Machado e Cunha, à Eng.<sup>a</sup> Regina Silva, ao Eng. António Silva, ao Fernando, ao José e ao António pelo acompanhamento e auxílio. Por fim, um grande agradecimento à Dr.<sup>a</sup> Tânia Azevedo, pelos conselhos, dedicação e ajuda.

De seguida, quero agradecer ao Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro pela disponibilidade prestada durante a dissertação, assim como pela sua orientação.

Aos meus pais, muito obrigado pelo constante e incessante apoio, assim como o seu sacrifício, procurando todas as condições para o meu sucesso. Um grande agradecimento ao resto de toda a minha família, em especial aos meus avós e irmão.

À Patrícia, muito obrigado pela ajuda, paciência, conselhos, companheirismo, confiança, motivação e por tudo mais que me dá.

Por fim, uma palavra de agradecimento aos meus colegas de curso, que me ajudaram ao longo dos meus anos académicos, particularmente ao Filipe, ao Luís, ao Marcos, à Patrícia e ao Pedro.

## RESUMO

---

Esta Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto resulta de um desafio colocado pela Firmago, para melhorar o rendimento e a eficiência de uma flange produzida numa liga de alumínio A356, com recurso ao software de simulação de enchimento e solidificação.

As ligas de alumínio são a família mais requisitada de ligas não ferrosas para a produção de peças fundidas, sendo cada vez maior a sua procura. Neste documento foram abordados os temas essenciais para um melhor conhecimento das mesmas, como a liga A356, os sistemas de gitagem e alimentação, e ainda o software SolidCast.

A flange em estudo é produzida no circuito manual em areia autossecativa. Atualmente, a peça está em produção com um rendimento de metal vazado de 57%. Tendo em conta o objetivo descrito previamente, foram definidos diversos parâmetros que podiam ser melhorados no modelo atualmente empregue pela empresa e os quais foram testados através de simulação, nomeadamente o volume dos alimentadores, o tempo e temperatura do vazamento e ainda o sistema de gitagem de Campbell. O software utilizado para a realização das simulações foi o SolidCast.

Após a validação da simulação e do ensaio físico, foi possível obter um modelo de gitagem e alimentação que permite obter uma peça sem porosidade com um rendimento de aproximadamente 72%, proporcionando assim uma redução de custo na produção destas peças.

### **Palavras-chave:**

Ligas de alumínio; Sistemas de alimentação; Sistemas de gitagem; Simulação de solidificação; SolidCast.

## **ABSTRACT**

---

This Dissertation of the Integrated Master's Degree in Metallurgical and Materials Engineering at the Faculty of Engineering of the University of Porto results from a challenge posed by Firmago, to improve the performance and efficiency of a flange produced in an A356 aluminum alloy, using filling and solidification simulation.

Aluminum alloys are the most requested family of non-ferrous alloys to produce castings, and their demand is increasing. This paper covers the essential topics for a better understanding of these alloys, such as the A356 alloy, casting and feeding systems, and SolidCast software.

The flange under study is produced in the manual circuit in selfsetting sand. Currently, the part is in production with a yield of 57%. Considering the previously described objective, several parameters that could be improved in the model currently employed by the company were defined and tested through simulation, namely the volume of the feeders, the pouring time and temperature, and the Campbell gating system. The software used for the simulations was SolidCast.

After the validation of the simulation and the physical trials, it was possible to obtain a gating and feeding model that allows to obtain a part without porosity with a yield of approximately 72%, thus providing a cost reduction in the production of these parts.

### **Keywords:**

Aluminium alloys; Feeding systems; Gating systems; Solidification simulation; SolidCast.

# ÍNDICE

---

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	viii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA .....	1
1.2. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.3. OBJETIVO E ÂMBITOS .....	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1. LIGAS DE ALUMÍNIO .....	4
2.1.1. Ligas de Alumínio-Silício .....	4
2.1.2. Liga de $AlSi_7Mg_{0,3}$ (A356.0) .....	5
2.1.2.1. Principais elementos da liga $AlSi_7Mg_{0,3}$ (A356.0) .....	5
2.2. PROCESSOS DE FUNDIÇÃO .....	6
2.3 SISTEMA DE GITAGEM .....	6
2.4. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO .....	8
2.4.1. Porosidade .....	9
2.4.2. Arrefecedores .....	10
2.5. SOLIDCAST .....	10
2.5.1. Vazamento (Pouring) .....	11
2.5.2. Tempo de solidificação (Solidification time) .....	11
2.5.3. Tempo até à fração crítica de sólido (Critical fraction solid time) .....	11
2.5.4. Densidade do material (Material density) .....	11
2.5.5. Gradiente térmico (Thermal gradient) .....	11
2.5.6. Velocidade de arrefecimento (Cooling rate) .....	12
2.5.7. Critério de Niyama (Niyama criterion) .....	12
2.5.8. Módulo térmico (Modulus) .....	12
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
3.1. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS .....	14

3.2. VARIÁVEIS DE SIMULAÇÃO .....	16
3.3. REALIZAÇÃO DO ENSAIO .....	17
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>18</b>
4.1. SIMULAÇÃO EM VAZIO .....	18
4.2. MODELO ATUAL .....	19
4.3. PROPOSTA 1 .....	23
4.4. PROPOSTA 2 .....	27
4.5. PROPOSTA 3 .....	30
4.6. PROPOSTA 4 .....	33
4.7. Análise económica .....	37
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>6. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>40</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>42</b>
Anexo A .....	42
ANEXO B .....	43
ANEXO C .....	45
ANEXO D .....	47
ANEXO E .....	49

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio Alumínio - Silício.....	5
Figura 2 - Esquema de um sistema de gitagem comumente utilizado na indústria de fundição .....	7
Figura 3 - Efeito da geometria do alimentador no volume de metal disponível para alimentação.....	9
Figura 4 - As formas de porosidade: a) interna, b) ambas e c) externa.....	10
Figura 5 - Modelo 3D da flange, com as dimensões gerais .....	13
Figura 6 - Esquema do processo de fundição de uma peça .....	14
Figura 7 - Curva de arrefecimento da liga A356.0.....	15
Figura 8 - Orientação da peça na simulação em vazio.....	18
Figura 9 - Parâmetros da simulação em vazio .....	18
Figura 10 - Resultado do parâmetro do módulo térmico da simulação em vazio .....	19
Figura 11 - Modelo de gitagem e alimentação atualmente utilizado na empresa .....	20
Figura 12 - Parâmetros da simulação do modelo atual .....	20
Figura 13 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação do modelo atual.....	21
Figura 14 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação do modelo atual .....	21
Figura 15 - Flange após limpeza e pré-maquinação.....	22
Figura 16 - Resultado do ensaio de raio-X para a flange vazada pelo modelo atualmente em produção na empresa .....	23
Figura 17 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 1 .....	24
Figura 18 - Parâmetros da simulação da Proposta 1 .....	25
Figura 19 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 1 .....	25
Figura 20 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 1 ..	26
Figura 21 - Resultado do ensaio de raio-X para a flange vazada pelo modelo da Proposta 1 .....	27
Figura 22 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 2.....	28
Figura 23 - Parâmetros da simulação da Proposta 2 .....	29
Figura 24 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 2 .....	29
Figura 25 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 2 ..	30
Figura 26 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 3.....	31
Figura 27 - Parâmetros da simulação da Proposta 3 .....	31
Figura 28 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 3 .....	32
Figura 29 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 3 ..	32
Figura 30 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 4.....	33
Figura 31 - Parâmetros da simulação da Proposta 4 .....	34

Figura 32 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 4 .....	34
Figura 33 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 4.	35
Figura 34 - Resultado do ensaio de raio-X para a flange vazada pelo modelo da Proposta 4 .....	36
Figura 35 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação do modelo atual.....	42
Figura 36 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação do modelo atual .....	42
Figura 37 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação do modelo atual .....	43
Figura 38 - Resultado do parâmetro do tempo solidificação da simulação da Proposta 1	44
Figura 39 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 1 .....	44
Figura 40 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 1..	45
Figura 41 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação da Proposta 2 .....	46
Figura 42 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 2 .....	46
Figura 43 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 2..	47
Figura 44 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação da Proposta 3 .....	47
Figura 45 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 3 .....	48
Figura 46 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 3..	48
Figura 47 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação da Proposta 4 .....	49
Figura 48 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 4 .....	49
Figura 49 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 4..	50

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela I - Composição química da liga Al7Si0,3Mg .....	5
Tabela II - Composição química da liga utilizada nos ensaios. ....	13
Tabela III - Parâmetros do software SolidCast comuns a todas as simulações .....	15
Tabela IV - Resumo das variáveis das propostas de melhoria.....	17

# 1. INTRODUÇÃO

---

Esta dissertação corresponde à última unidade curricular do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A dissertação, desenvolvida em ambiente empresarial na Firmago, baseou-se num estudo de melhoria do rendimento de uma flange produzida na liga  $AlSi_7Mg_{0,3}$ , a mais comumente usada na empresa. Para tal, recorreu-se ao *software* de solidificação existente na empresa (SolidCast) para realizar simulações, de modo a prever os resultados e avaliar as melhorias.

## 1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

Fundada em 1969 por Firmino Martins Gomes, a Firmago S.A., trata-se de uma empresa cuja área de trabalho se centra na produção de peças de alumínio através de processos de fundição em areia e coquilha.

A Firmago começou por produzir peças para o setor da energia, mas tem vindo a diversificar a sua produção para as mais diversas indústrias, nomeadamente a automóvel, petrolífera e a química.

Atualmente com mais de 100 funcionários, a Firmago exporta cerca de 85% da sua produção, para mercados exigentes como os da Alemanha, França, Suécia, Áustria, República Checa, Holanda, Bélgica e Estados Unidos.

Os 51 anos de experiência da Firmago, aliados às melhores tecnologias disponíveis e à qualidade das suas instalações, permitem o fabrico de peças de alta qualidade, mantendo a visibilidade desta empresa a par das exigências do mercado competitivo atual nos variados setores [1].

A Firmago apresenta diversos serviços:

- Produção dos moldes e placas molde;
- Produção de machos;
- Fundição em areia verde e em areia autossecativa;
- Pré-maquinação;
- Granalhagem;
- Maquinação;
- Pintura;
- Anodização e tratamentos térmicos;
- Qualidade (ensaios não-destrutivos, metalografias,...).

## 1.2. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

Este documento foi realizado no âmbito da dissertação de Mestrado e surge da necessidade da Firmago em otimizar o rendimento de uma flange, produzida no circuito manual, em areia autossecativa. Com centenas de flanges fabricadas por mês, é

importante que esta seja uma peça que apresente uma excelente rentabilidade no processo. Atualmente, a flange apresenta um rendimento de aproximadamente 57%, pelo que é possível realizar um conjunto de melhorias no sistema de alimentação e gitagem, tornar mais eficiente o volume de alumínio e, conseqüentemente, aumentar o rendimento e o lucro que advém da venda das mesmas.

### 1.3. OBJETIVO E ÂMBITOS

Esta dissertação teve como objetivo aumentar o rendimento do sistema de alimentação e gitagem da flange e, conseqüentemente, do rendimento do metal vazado numa peça grande, produzida em série e com uma função crítica. Para tal foi usado o *software* de simulação SolidCast, que está disponível na empresa.

Através dos resultados das simulações, foi ainda analisada a conformidade das peças através de radioscopia, de modo a prever defeitos críticos resultantes do enchimento e solidificação.

Por fim, esta dissertação teve ainda o objetivo de implementar as melhorias resultantes do estudo heurístico e utilização de *software* de simulação, assim como realizar a validação experimental.

### 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O corpo de texto do trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos principais:

- Capítulo 1: o presente capítulo, introdutório, onde se destaca uma breve introdução da empresa, assim como o enquadramento e objetivos desta dissertação;
- Capítulo 2: corresponde ao estado de arte. Um trabalho de pesquisa bibliográfica, sobre as ligas de alumínio, mais especificamente das ligas Al-Si e da liga AlSi<sub>7</sub>Mg<sub>0,3</sub>. São também abordados os temas dos sistemas de gitagem e de alimentação. Por fim, é ainda abordado o *software* SolidCast;
- Capítulo 3: descreve a técnica experimental, nos seus diferentes parâmetros e valores utilizados para as simulações efetuadas;
- Capítulo 4: neste capítulo são apresentados os resultados e a discussão dos mesmos;
- Capítulo 5: reúne as conclusões do trabalho desenvolvido e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

O trabalho conclui-se apresentando a referenciação das fontes utilizadas seguindo a metodologia do *software* EndNote.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

O alumínio é o metal não ferroso mais utilizado no mundo, sendo muito procurado nas mais diversas indústrias, nomeadamente a indústria automóvel, aeroespacial e alimentar. O alumínio é um metal leve, com uma densidade no estado sólido de aproximadamente  $2,68 \text{ g/cm}^3$  (cerca de um terço das densidades do ferro e do cobre), enquanto apresenta resistência mecânica que pode atingir os 500 MPa. Através destes dois fatores, o alumínio é visto como um candidato a substituto das ligas ferrosas nas mais diversas funções e indústrias, principalmente na indústria automóvel, que visa a redução de peso e conseqüente redução de combustível consumido. O alumínio apresenta ainda elevada condutividade elétrica e térmica (cerca de dois terços e metade, respetivamente, quando comparado com o cobre), um baixo ponto de fusão de, aproximadamente,  $660^\circ\text{C}$  e não é tóxico. O alumínio é também muito resistente à corrosão atmosférica, uma vez que existe a formação de um filme de óxido natural resistente na superfície do metal, prevenindo a corrosão do mesmo [2-4].

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, totalizando 8% da sua massa, procedendo apenas o oxigénio e o silício. Este não se apresenta na sua forma elementar, mas através de óxidos e silicatos, por exemplo, na forma de bauxite e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Em 1825, o químico dinamarquês Hans-Christian obtém pela primeira vez alumínio quase puro, através da redução de cloreto de alumínio. No entanto, apenas em 1886, é desenvolvido o processo Hall-Herould, ainda utilizado atualmente, permitindo um método economicamente viável da extração de alumínio da alumina. Em 1888, Karl Bayer patenteia o processo de Bayer, que permite obter alumina comercial a partir da bauxite. Toda a produção de alumínio primário é baseada no conceito destes dois processos [2-4].

O alumínio tem uma característica fundamental que é a sua reciclabilidade. O alumínio pode ser 100% reciclado, consumindo apenas entre 5 a 8% da energia necessária para produzir alumínio primário. Isto permite ainda uma redução da produção de  $\text{CO}_2$ . O alumínio pode ser reciclado inúmeras vezes sem perder as propriedades originais. A reciclagem do alumínio permite que cerca de 75% de todo o alumínio produzido ainda esteja em circulação atualmente. As indústrias automóvel e construção utilizam mais de 90% de alumínio secundário, enquanto que a indústria de latas usa cerca de 75%. O alumínio permite assim um elevado grau de sustentabilidade [2, 5].

As ligas de alumínio podem ser produzidas de diversas maneiras desde processos tradicionais como a fundição e a injeção, até processos mais recentes, como por exemplo, o fabrico aditivo. Todos estes processos permitem um produto muito semelhante à sua forma final [6, 7].

O alumínio apresenta uma estrutura cristalina cúbica de face centrada e apresenta, conseqüentemente, um fator de empilhamento atómico de 0,74. A distância mais próxima entre dois átomos de alumínio na sua estrutura cristalina é de  $2,863\text{\AA}$  [4].

## 2.1. LIGAS DE ALUMÍNIO

O sistema de nomenclatura das ligas de alumínio d'A Associação de Alumínio dos Estados Unidos da América é o mais conhecido internacionalmente. Este sistema depende da composição química e contém duas vareáveis: ligas forjadas e ligas de fundição. A designação das ligas é composta por quatro dígitos, sendo que nas ligas de fundição, o último dígito é decimal. As famílias das ligas de fundição são [7]:

- 1xx.x - Alumínio não ligado (comercialmente puro), com a composição controlada;
- 2xx.x - ligas de Al-Cu;
- 3xx.x - ligas de Al-Si-Cu/Mg;
- 4xx.x - ligas de Al-Si;
- 5xx.x - ligas de Al-Mg;
- 6xx.x - não utilizada;
- 7xx.x - ligas de Al-Zn;
- 8xx.x - ligas de Al-Sn;
- 9xx.x - ligas com outros elementos.

O primeiro dígito define o elemento mais comum na liga. Nas ligas de fundição, o segundo e terceiro dígitos servem para a identificação mais específica da liga dentro das famílias de ligas das séries 2xx.x até à 9xx.x, enquanto que para as ligas 1xx.x, indicam a sua pureza. Nas ligas de fundição, os dígitos decimais indicam a forma do produto: a décima .0 refere um produto fundido enquanto as décimas .1 e .2 designam lingotes [7].

Neste trabalho, segundo o sistema de nomenclatura apresentado, a liga utilizada será a A356.0. Esta liga, também conhecida por  $AlSi_7Mg_{0,3}$ , pertence à família de ligas 3xx.x pois apresenta o silício como o principal elemento de liga, e apresenta ainda magnésio na sua constituição. O segundo e terceiro dígitos indicam a especificidade da liga, e o dígito decimal é zero, uma vez que se trata de uma peça fundida.

### 2.1.1. Ligas de Alumínio-Silício

As ligas de alumínio-silício representam aproximadamente 90% de peças fundidas de todas as ligas de alumínio. Estas ligas apresentam excelentes características de fluidez, boa resistência à corrosão, boa soldabilidade e ainda baixo coeficiente de expansão térmica.

As ligas binárias de Al-Si têm um ponto eutético para uma percentagem de 12,2% de silício, a uma temperatura de 577 °C. Estas podem ser hipoeutéticas (para teores de Si menores que 12,2%), eutéticas (para teores de Si maiores que 12,2%) e ainda hipereutéticas (para teores de Si entre 12,2% e 22%). O diagrama de equilíbrio pode ser visualizado na Figura 1 [6, 7].

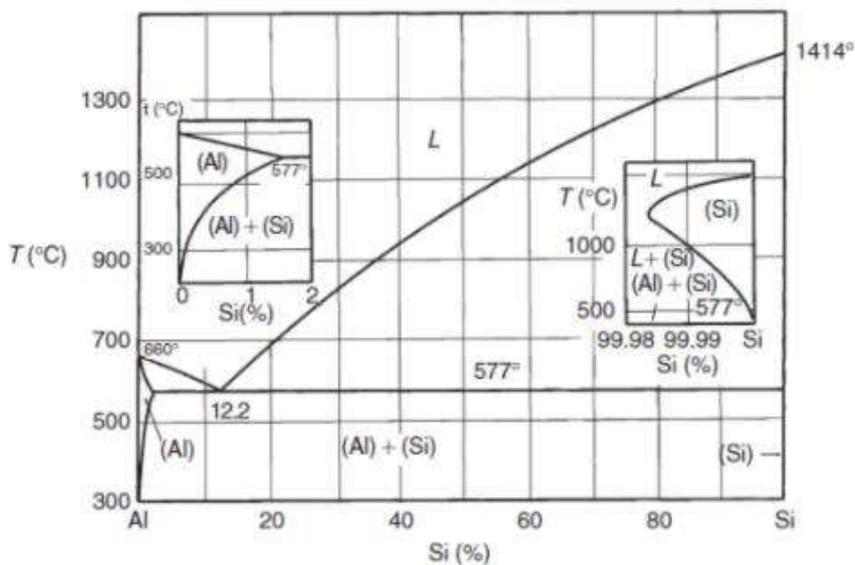


Figura 1 - Diagrama de equilíbrio Alumínio - Silício [6]

### 2.1.2. Liga de $AlSi_7Mg_{0,3}$ (A356.0)

A liga utilizada neste trabalho é uma liga do 3xx.x, uma vez que apresenta o silício como elemento de liga principal, e ainda com a presença de magnésio. A liga pertence igualmente ao sistema Al-Si-Mg, e apresenta um teor de 7% de silício e apenas 0,3% de magnésio. Uma vez que tem um teor menor que 12,2% de silício, trata-se de uma liga hipoeutética. A composição química da liga de referência está apresentada na Tabela I.

Tabela I - Composição química da liga  $Al_7Si_{0,3}Mg$  [8].

Elemento Químico	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Outros
Máximo (%)	7,5	0,2	0,2	0,1	0,5	0,1	0,2	0,2
Mínimo (%)	6,5	-	-	-	-	-	-	-

#### 2.1.2.1. Principais elementos da liga $AlSi_7Mg_{0,3}$ (A356.0)

Os principais elementos de liga presentes na liga  $AlSi_7Mg_{0,3}$  são:

- O silício;
- O magnésio.

O silício, o principal elemento de liga da família de ligas 3xx.x, confere, ao metal líquido, uma elevada fluidez devido ao elevado calor latente do silício (cerca de cinco vezes maior que o calor latente do alumínio). Assim, a liga permanece no estado líquido durante um maior período ao longo do enchimento. Este aspeto permite um enchimento mais fácil de peças com geometrias complexas e/ou finas. O silício também diminui o coeficiente de expansão térmica, o que permite que haja uma menor contração na

solidificação do banho metálico. A adição de silício permite ainda um aumento de dureza da resistência ao desgaste [9, 10].

Segundo Warmuzek [10], o teor de silício (em massa) e os seus consequentes efeitos podem ser divididos em 3 segmentos [10]:

- Teores de 0 a 0,01%: existe um aumento da resistência mecânica. Existe ainda um aumento do limite de elasticidade e uma consequente diminuição da ductilidade. Este efeito ocorre devido à diferença de diâmetro entre os átomos de silício e os de alumínio;
- Teores de 0,01 a 1,65%: existe o endurecimento por precipitação. Se aplicada uma taxa de arrefecimento suficientemente elevada, a solução sólida de alumínio  $\alpha$  pode ficar sobressaturada em Si, o que origina a precipitação das partículas;
- Teores maiores que 1,65%: existem 2 fases (alumínio  $\alpha$  e Si). As propriedades mecânicas são uma combinação de ambas.

O magnésio melhora as propriedades mecânicas das ligas Al-Si-Mg, em consequência da formação do composto intermetálico  $Mg_2Si$ , após o tratamento térmico (T6). Um estudo de Esgandari, et al. [11] mostra que ao acrescentar 1% de magnésio à liga  $AlSi_7Mg_{0,3}$ , melhora a sua resistência à fluência, devido a uma maior formação de  $Mg_2Si$  na microestrutura, que reduz a quantidade de deslocações e deslizamentos nas fronteiras de grão. No entanto, a formação deste composto durante a solidificação diminui a ductilidade e a tenacidade à fratura da liga [11].

## 2.2. PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

As ligas de alumínio podem ser fabricadas por fabrico aditivo e em diversos processos de fundição [4]:

- Fundição em areia (areia verde, areia autosssecativa);
- Fundição em coquilha;
- Fundição injetada (baixa e alta pressão).

Neste trabalho, o fabrico das peças em estudo, foi realizado através de fundição em areia, no processo em areia autosssecativa. Neste processo, são misturados na areia resinas, catalizadores ou outros agentes de ligação, que permitem uma cura, térmica ou química, endurecendo e dando forma à areia [4].

## 2.3 SISTEMA DE GITAGEM

O sistema de gitagem de uma determinada peça é dividido em várias partes: Gito, colo do gito, filtros, canais de distribuição e ataques. Este sistema tem várias funções, nomeadamente levar o metal líquido do exterior da moldação para a cavidade moldante, assim como controlar a velocidade de enchimento nesta última. O número de componentes, e o seu posicionamento, é determinado por diversos fatores, tendo como

principal as dimensões da peça a ser vazada. Um sistema de gitagem comum é apresentado no esquema da Figura 2.

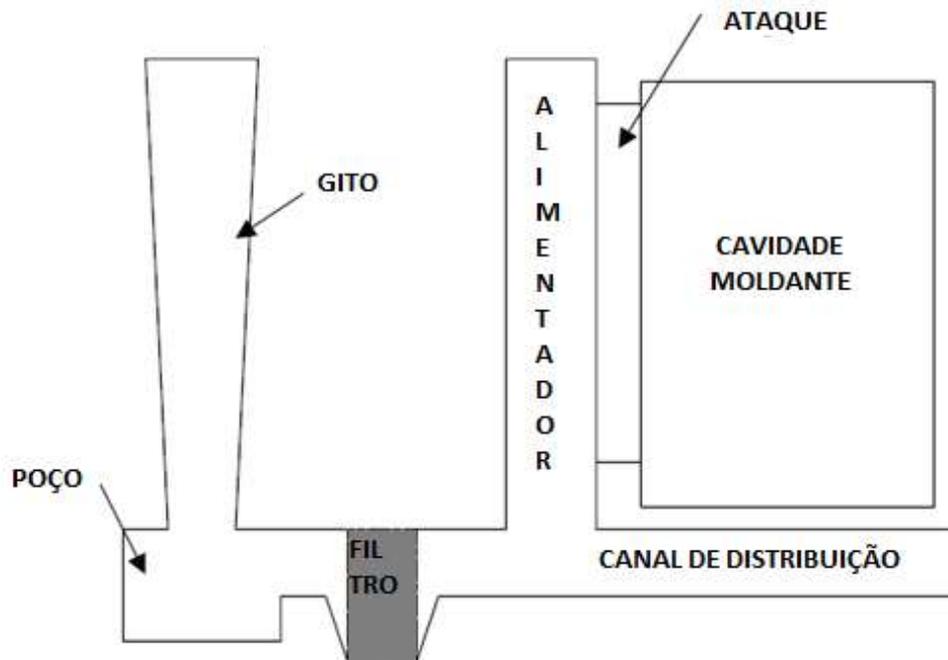


Figura 2 - Esquema de um sistema de gitagem comumente utilizado na indústria de fundição, adaptado de [12].

Nos sistemas de moldação em areia, o gito é um canal no qual se verte o metal líquido e é o ponto de entrada. É comum a colocação de uma bacia de enchimento, que facilita o vazamento do metal, devido a uma maior secção que o gito. Ao descer pelo gito, o metal líquido acelera devido à força da gravidade, promovendo o aumento de turbulência, provavelmente a mais forte ao longo de todo o sistema. Conseqüentemente, existe a possibilidade da superfície entrar em contacto com o ar e formar óxidos. Como é possível verificar na Figura 2, o gito torna-se mais estreito à medida que se aproxima do poço. Desta forma, não permite o aprisionamento de ar enquanto o metal entra na moldação. No decorrer do vazamento, o operador deve assegurar que o gito esteja cheio durante a operação, permitindo assim um fluxo uniforme no restante sistema de gitagem.

Assim que o metal chega ao fim do gito, este tem que mudar de direção de modo a fluir para os canais de distribuição. Esta ação leva à ocorrência de salpicos de alumínio, que poderão solidificar instantaneamente e ser empurrados até à cavidade moldante. De modo a prevenir este fenómeno, é utilizado um poço do gito, obrigando o fluxo de metal a cair e a perder a sua energia cinética antes de passar para os canais de distribuição. O poço do gito evita ainda que sejam transportados óxidos.

Um outro método utilizado para evitar a passagem de óxidos para a cavidade moldante é através da utilização de filtros. Estes são frequentemente utilizados na fundição entre o gito e os canais de distribuição. Estes componentes, normalmente cerâmicos, tem duas funções principais:

- Impedir a passagem de escória para os canais de distribuição e, por consequência, para a cavidade moldante.

- Reduzir a turbulência proveniente do vazamento.

Os canais de distribuição conduzem o metal líquido desde o gito aos ataques e, por fim, à cavidade moldante. Apesar da turbulência do metal ser mínima nesta etapa do percurso, estes canais não devem permitir que aumente a turbulência, assim como reduzir a hipótese de formação de bolhas de ar e ainda proporcionar um bom fluxo do metal. Não existindo turbulência, permite que o óxido formado na superfície do metal líquido não quebre e se misture com o resto do metal. Os canais de distribuição são frequentemente prolongados para além dos ataques, de modo a que o primeiro metal a entrar, normalmente com uma maior percentagem de óxido, fique preso e não passe para peça.

Os ataques levam o metal desde os canais de distribuição para a cavidade moldante, permitindo assim que esta última encha e forme a peça desejada [12].

#### 2.4. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação, em conjunto com o sistema de gitagem, permitem obter peças com uma boa sanidade, livres de porosidades e/ou rechupes, através de funções distintas. A alimentação de uma determinada peça é um processo demorado, em contraste com o enchimento da mesma. Este trabalho é realizado por alimentadores, que alimentam o rechepe durante a solidificação, garantindo que a peça permaneça sã. Estes devem estar colocados de modo que trabalhem efetivamente, alimentando as zonas quentes da peça. Para tal, devem ser identificados estes pontos previamente ao planeamento do sistema de alimentação [13].

De modo a determinar as dimensões corretas dos alimentadores a utilizar, pode-se recorrer a dois critérios distintos:

- Critério do módulo;
- Critério do volume.

O critério que apresentar um alimentador de maior dimensão deve ser o predominante [13].

O critério do módulo utiliza a Equação I, onde  $M_a$  é o módulo do alimentador,  $M_p$  é o módulo térmico da peça e  $\delta$  é o produto do fator de posição e do fator de liga.

$$M_a = \delta * M_p \quad \text{Equação I}$$

De seguida, de modo a obter o diâmetro do alimentador, devemos utilizar a equação II, onde  $c$  é uma constante e  $D_{alim}$  é o diâmetro do alimentador.

$$M_a = c * D_{alim} \quad \text{Equação II}$$

O critério do volume é calculado através da Equação III, onde  $V_{peça}$  corresponde ao volume da peça a alimentar,  $\beta$  à contração volúmica da liga após arrefecimento, e  $\mu$  o rendimento do alimentador.

$$V_{alimentador} = V_{peça} * \left(\frac{\beta}{\mu - \beta}\right) \quad \text{Equação III}$$

Para verificar qual o rendimento do alimentador, utiliza-se os valores indicados na Figura 3.

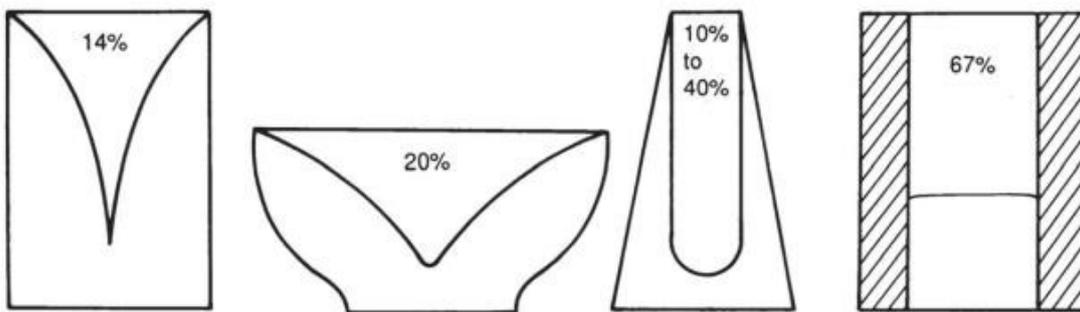


Figura 3 – Efeito da geometria do alimentador no volume de metal disponível para alimentação [13].

De seguida, de modo a obter o diâmetro do alimentador, devemos utilizar a equação IV, onde  $c$  é uma constante e  $D_{alim}$  é o diâmetro do alimentador.

$$V = c * D^3 \quad \text{Equação IV}$$

### 2.4.1. Porosidade

A porosidade é um defeito comum em peças fundidas. Existem três tipos de porosidade [13]:

- Interna;
- Externa;
- Ambas.

Estas podem ser ainda macro ou micro consoante o tamanho. Na Figura 4 estão apresentados exemplos de porosidades internas, externas e de ambas.

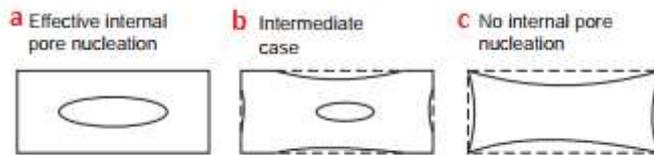


Figura 4 - As formas de porosidade: a) interna, b) ambas e c) externa [13].

A porosidade pode ser formada através de aprisionamento de bolhas de ar ou pela contração do metal. Estas origens podem evitadas através da diminuição da turbulência do banho metálico e através do sistema de alimentação da peça, respetivamente. John Campbell [13] indica que na ausência de gás e um sistema de alimentação adequado, não pode existir porosidade nas peças fundidas [13].

### 2.4.2. Arrefecedores

Os arrefecedores são instrumentos cruciais no sistema de alimentação. Estes direcionam a solidificação do alumínio no sentido dos alimentadores, proporcionando o que se chama de “solidificação dirigida”, e permitindo assim obter uma melhor sanidade na peça. Podem ser feitos de diversos materiais, mas são geralmente em aço.

Os arrefecedores podem ser:

- Externos: colocados no exterior da cavidade, ou seja, nas meias moldações de areia;
- Internos: colocados no interior da cavidade.

Os arrefecedores internos não são muito comuns nas peças de ligas de alumínio, uma vez que é formado um filme de óxido na zona do arrefecedor. Este problema não é habitual nos arrefecedores externos pois costumam ser aplicados em zonas que serão maquinadas posteriormente, e, conseqüentemente, será removido o filme.

### 2.5. SOLIDCAST

O SolidCast, em conjunto com o FlowCast, é um *software* de simulação de enchimento e solidificação, de diferenças finitas, que permite prever o comportamento dos sistemas de gítagem e alimentação respetivamente. Foi desenvolvido pela Finite Solutions Incorporate em 1985 e foi sendo melhorado ao longo dos anos [14].

Após uma simulação de enchimento e/ou solidificação, o software SolidCast tem a possibilidade de avaliar diversos parâmetros de pós-processamento, de modo a prevenir a sanidade da peça simulada. De seguida, serão apresentados os parâmetros resultantes da simulação de enchimento e solidificação do SolidCast.

### 2.5.1. Vazamento (Pouring)

O vazamento simulado com o *software* FlowCast, que faz parte do SolidCast. Este parâmetro permite simular e analisar o comportamento do metal fundido ao longo do sistema de gitagem, assim como no enchimento da(s) cavidade(s), e avaliar a sua eficácia. Possibilita ainda calcular as perdas térmicas do fluxo metálico durante o vazamento, o que viabiliza um início de simulação de solidificação mais fidedigno no SolidCast [15].

### 2.5.2. Tempo de solidificação (Solidification time)

O tempo de solidificação mostra o tempo, em minutos, que demora a solidificar as diversas zonas da peça. Neste parâmetro procura-se uma boa progressão da solidificação, pois áreas isoladas têm tendência a formar porosidade [16].

### 2.5.3. Tempo até à fração crítica de sólido (Critical fraction solid time)

O tempo de fração crítica de sólido é contabilizado em minutos e indica quando o metal já se encontra suficientemente sólido, impossibilitando um fluxo ou troca de metal fundido entre secções da peça. Tal como o tempo de solidificação, é de esperar uma boa progressão, desde o centro da peça até aos alimentadores. Se alguma área ficar isolada, será propensa a formar porosidade [17].

### 2.5.4. Densidade do material (Material density)

A densidade do material é um resultado relativo à influência da contração da liga e do fluxo do metal fundido, durante o processo de solidificação. Este parâmetro prevê a macroporosidade nas diferentes zonas das peças [18].

Este critério pode apresentar valores entre 0 e 1, sendo que 0 é uma zona sem metal, enquanto o valor de 1 é para zonas 100% de metal, sem qualquer tipo de porosidade. Geralmente, os valores entre 0,995 e 0,990 fornecem excelente informação sobre as áreas que contêm defeitos de porosidade. O valor utilizado durante neste documento será de 0,999 [18].

No entanto, este software apenas consegue prever a macroporosidade no alumínio. De modo a prever microporosidade estrutural pode ser utilizado outros parâmetros, como por exemplo, o critério de Niyama e o tempo até à fração crítica de sólido [18].

### 2.5.5. Gradiente térmico (Thermal gradient)

O gradiente térmico permite verificar as diferenças de temperatura entre as diferentes zonas da peça. Um gradiente térmico elevado significa que há uma grande mudança de temperatura entre dois pontos próximos da peça fundida. Um gradiente térmico baixo significa uma pequena variação de temperatura de um ponto para o outro.

Esta parâmetro é apresentado em °C por centímetro (°C/cm) [19].

### 2.5.6. Velocidade de arrefecimento (Cooling rate)

A velocidade de arrefecimento mede o tempo necessário para que cada ponto atinga o ponto de Niyama. Segundo este parâmetro, as áreas da peça que arrefecem rapidamente têm, geralmente, uma microestrutura mais favorável, e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas, como a resistência mecânica e a dureza. Este indicador é medido em °C por minuto (°C/min) [20].

### 2.5.7. Critério de Niyama (Niyama criterion)

O critério de Niyama foi desenvolvido pelo Dr. Niyama, um investigador japonês que estudava a previsão de porosidade em aço ao carbono e é uma função baseada em dois parâmetros, nomeadamente o gradiente térmico e a velocidade de arrefecimento. O Dr. Niyama descobriu que (para valores menores que 1) o gradiente térmico dividido pela raiz quadrada da velocidade de arrefecimento correspondia à possível presença de micro porosidade em peças fundidas de aço [21].

O critério de Niyama tem sido amplamente utilizado para a previsão do encolhimento em peças fundidas, até à utilização de cálculos mais avançados, tais como o cálculo da densidade do material, presente no Capítulo 2.5.4 [21].

O critério Niyama foi alargado a outras ligas para além do aço. Este parâmetro é basicamente uma previsão de solidificação direcional. Uma solidificação direcional má é representada por um valor de 0 enquanto uma solidificação direcional boa apresenta valores mais elevados. Quanto menor o valor deste parâmetro, maior a probabilidade de porosidade. Pontos com valores acima do número crítico, apresentam uma probabilidade de porosidade baixa [21].

Os valores do critério de Niyama utilizados pelo alumínio encontram-se entre 0 e 0,3 [21].

O critério de Niyama baseia-se apenas na transferência de calor, não tendo em consideração o efeito da gravidade. Para a maioria dos materiais ferrosos, a função de densidade do material (que tem em conta a gravidade) é geralmente um melhor indicador. Contudo, o critério de Niyama é ainda muito utilizado em muitas aplicações não-ferrosas (normalmente em ligas de alumínio) [21].

### 2.5.8. Módulo térmico (Modulus)

O módulo de uma determinada secção é definido pelo quociente entre o volume e a área de arrefecimento dessa secção. Assim, as secções das peças que apresentam o módulo mais elevado representam as últimas secções a solidificar [18].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A validação da otimização do sistema de alimentação e gitagem numa flange foi realizada utilizando os *softwares* do SolidWorks (para a modelação 3D) e do FlowCast e SolidCast (para a simulação de vazamento e arrefecimento, respetivamente). A peça em estudo é uma flange, com um diâmetro máximo de 595mm e uma altura máxima de 200mm. Devido à sua dimensão, esta é produzida no circuito de areia autossecativa, que permite o fabrico de peças de maiores dimensões. Esta peça tem a geometria apresentada na Figura 5.

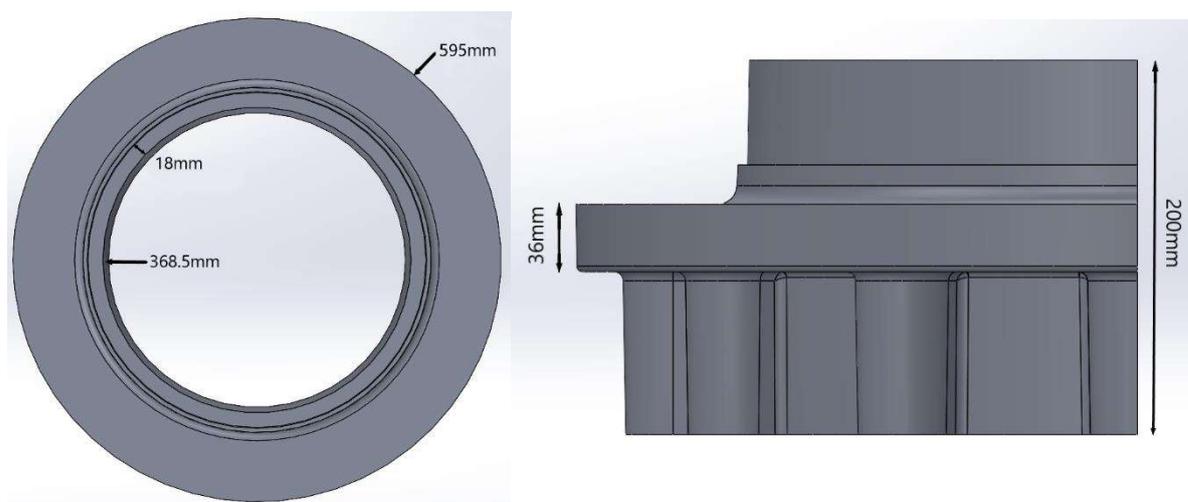


Figura 5 – Modelo 3D da flange, com as dimensões gerais.

A flange é vazada na liga AlSi7Mg0,3 (A356.0), com uma composição apresentada na Tabela II e tem uma massa de aproximadamente 43kg.

Tabela II - Composição química da liga utilizada nos ensaios.

Elemento Químico	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
%	7,13	0,10	0,00	0,00	0,31	0,00	0,15

O projeto iniciou com a receção do desenho técnico da peça em questão. De seguida é realizado um estudo dos sistemas de gitagem e alimentação necessários para a peça. Estes são testados através das simulações de enchimento e solidificação. Uma vez aprovados, é iniciada a produção da placa molde (e caixas de machos, caso sejam necessárias).

O fabrico das peças inicia-se pela elaboração do banho de alumínio, que é fundido, afinado e desgaseificado. Enquanto o alumínio passa por estas etapas, é produzida a moldação com recurso à placa molde. Por fim, o banho é passado para uma colher, onde é medida a temperatura do banho utilizando uma vara pirométrica antes do vazamento das peças.

Após o arrefecimento do cacho, este é desmoldado e granalhado, e prossegue para a zona de corte, onde são retirados o gito, canais e alimentadores. De seguida, a peça é encaminhada para a zona dos acabamentos, onde a peça é lixada na zona dos ataques dos alimentadores. Finalmente, a peça é maquinada e preparada para a sua embalagem. Na Figura 6 está um esquema resumido do processo de fundição de uma peça. Em cima, vemos os passos realizados pelo departamento técnico e pela carpintaria. No meio estão as diferentes fases que permitem o fabrico das peças. Por fim, em baixo, estão as etapas necessárias para que a peça esteja finalizada.

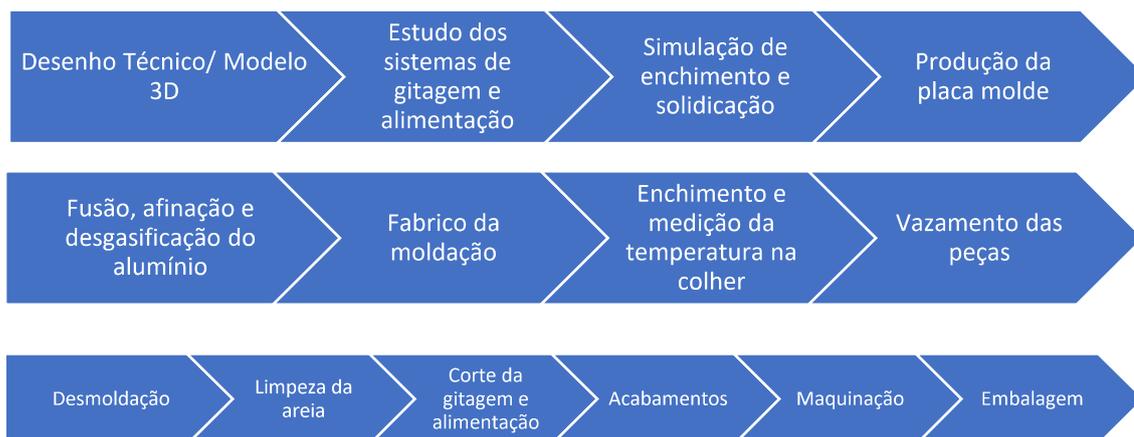


Figura 6 – Esquema do processo de fundição de uma peça.

### 3.1. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS

Para todas as simulações, foram utilizados parâmetros comuns do software, de modo a reduzir o número de variáveis a averiguar, conforme a Tabela III e na Figura 7.

Tabela III - Parâmetros do software SolidCast comuns a todas as simulações [22].

Parâmetro		Valores
Liga utilizada		A356.0
Condutividade térmica		159,12 W/m-K
Calor específico		962,3 J/kg-k
Densidade		2684,62 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de solidificação		542 °C
Calor latente de fusão		388175,1 J/kg
Molde (areia sílica)	Temperatura inicial	26,667 °C
	Condutividade térmica	0,59 W/m-K
	Calor específico	1075,288 J/kg-k
	Espessura da moldação	50mm
Arrefecedor	Temperatura inicial	26,667 °C
	Condutividade térmica	44,97 W/m-K
	Calor específico	460,24 J/kg-k
Camisa	Temperatura inicial	26,667 °C
	Condutividade térmica	0,484 W/m-K
	Calor específico	836,8 J/kg-k
	Temperatura de queima	720 °C
	Tempo de queima	1,5 minutos
	Temperatura de ignição	93,333 °C
Temperatura ambiente		25 °C

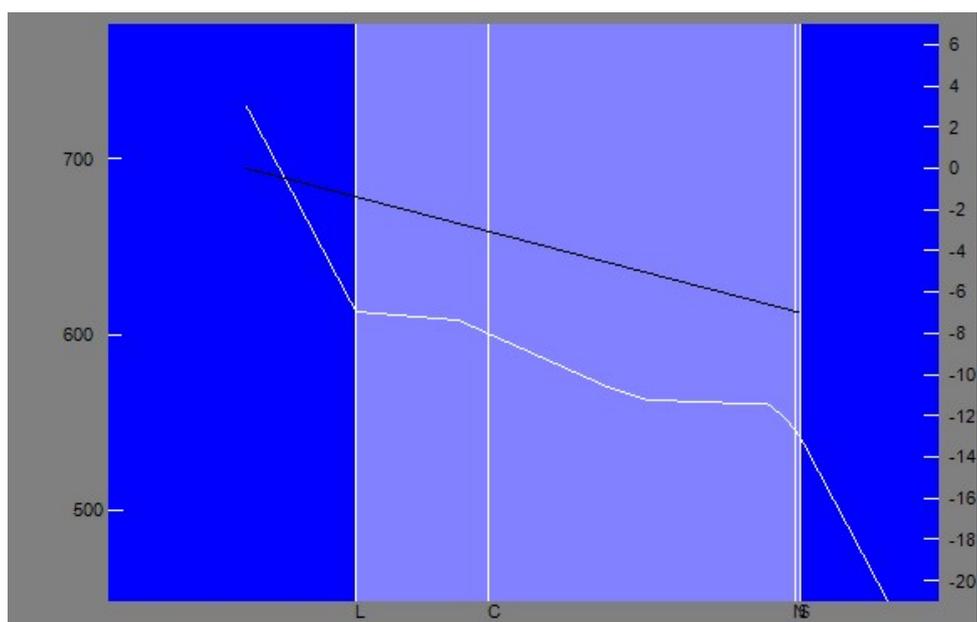


Figura 7 - Curva de arrefecimento da liga A356.0 [22].

Na Figura 7 podemos verificar que a temperatura de *liquidus* da liga é ligeiramente acima de 600°C e que apenas solidifica a uma temperatura de 542°C, valor exato indicado na Tabela III.

Ainda na Figura 7, podemos observar, a preto, a linha estimada de contração do material. As simulações no software podem demorar entre 40 a 50 horas até se obter os resultados.

### 3.2. VARIÁVEIS DE SIMULAÇÃO

Para aumentar a eficiência do metal vazado na flange, foram concretizadas diversas simulações, que seguem os seguintes tópicos:

- Simulação em vazio;
- Método atual da empresa;
- Utilização de camisas;
- Geometria dos alimentadores;
- Gitagem da peça;
- Temperatura de vazamento;
- Tempo de vazamento;

A simulação em vazio foi realizada de maneira a obter o diagrama térmico da flange. Este permitiu avaliar os pontos quentes da peça, que podem ser problemáticos, pois são a última secção da peça a solidificar, sendo assim, propícias a formação de rechupes.

De seguida, como referência, foi simulado o método atualmente utilizado pela empresa. Esta simulação definiu os parâmetros padrão das simulações. Assim, este sistema apresenta:

- Não utiliza camisas;
- 4 alimentadores cilíndricos de diâmetro 100 mm atmosféricos;
- Arrefecedores interiores e de base, personalizados à flange;
- 2 canais de distribuição de 40 mm x 30 mm;
- Temperatura de vazamento de 730 °C;
- Tempo de vazamento de 40 s.

Partindo do método atualmente implementado pela empresa, foram aperfeiçoados os parâmetros das 5 variáveis apresentadas em cima. Uma vez que os arrefecedores utilizados nesta peça já são personalizados, foi descartada como variável.

Em primeiro lugar foi testada a eficiência da presença de camisa nos alimentadores da moldação. O diâmetro dos alimentadores foi reduzido, de modo a diminuir a massa de alumínio utilizada na alimentação, sem comprometer a sanidade da flange. Para tal foi utilizado os critérios do módulo e do volume.

Relativamente à gitagem, foram explorados dois sistemas:

- O sistema atual;

- Alteração para o sistema de gitagem de Campbell.

Por fim, foi averiguado o efeito da temperatura e tempo de vazamento, respetivamente. Para tal, foi considerando a temperatura base de  $730 \pm 20^{\circ}\text{C}$ , com incrementos de  $2^{\circ}\text{C}$ . No que diz respeito ao tempo, foi considerado o tempo de vazamento base de  $40 \pm 4$  segundos, com acréscimos de 1 segundo.

As diferentes variáveis das propostas estão resumidas na Tabela IV.

Tabela IV – Resumo das variáveis das propostas de melhoria.

Proposta	Camisa	Tamanho dos alimentadores	Sistema de gitagem	Temperatura de vazamento	Tempo de vazamento
1	Sim	Ø80	Não	Não	Não
2	Sim	Ø60	Não	Não	Não
3	Não	Ø60	Sim	Não	Não
4	Sim	Ø60	Não	Sim	Sim

### 3.3. REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Depois de realizadas as simulações, foram analisados os resultados e validados com a realização de ensaios físicos. Para tal, foi alterada a placa-molde, segundo os parâmetros definidos na simulação para cada proposta ensaiada fisicamente. De seguida, foram fabricadas as moldações na linha manual, em areia autosecativa. Após o vazamento e desmoldação das peças, estas foram granalhadas e pré-maquinadas, de modo a limpar a peça e retirar o sistema de gitagem e alimentação, respetivamente. As peças foram submetidas aos ensaios não destrutivos de raio-X.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. SIMULAÇÃO EM VAZIO

Para gerar um diagrama térmico, foi realizada uma simulação em vazio com a flange orientada na forma apresentada na Figura 8.

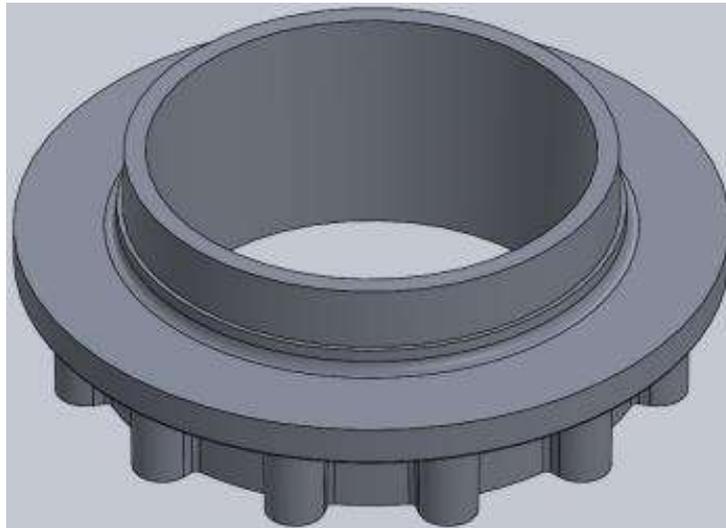


Figura 8 - Orientação da peça na simulação em vazio.

Como referido anteriormente, foi utilizada a liga A356.0 para o vazamento, assim como uma temperatura inicial de 730°C. Uma vez que se trata da simulação em vazio, o tempo de vazamento foi considerado de 0 segundos. Foi ainda considerado uma malha de 2,5 mm. Está apresentado na Figura 9, o resumo das variáveis utilizadas.

	Al 356.0	Mesh Name	Mesh 1
Thermal Conductivity	159,12	W/m-K	
Specific Heat	962,3	J/kg-k	
Density	2684,62	kg/m <sup>3</sup>	
Initial Temperature	730	C	
Solidification Temperature	542	C	
Freezing Range	71	C	
Latent Heat of Fusion	388175,1	J/kg	
		<input type="radio"/> Number of Nodes	
		<input checked="" type="radio"/> Node Size	2,5 mm
		Mold Type	Rectangular
		Mold Material	Silica Sand
		Mold Thickness	50 (mm)
		<input type="checkbox"/> Mold Open Top	
		Ambient Temperature	25 C
		Pour Time	0 sec

Figura 9 - Parâmetros da simulação em vazio.

Na Figura 10 é apresentado o diagrama térmico da flange.

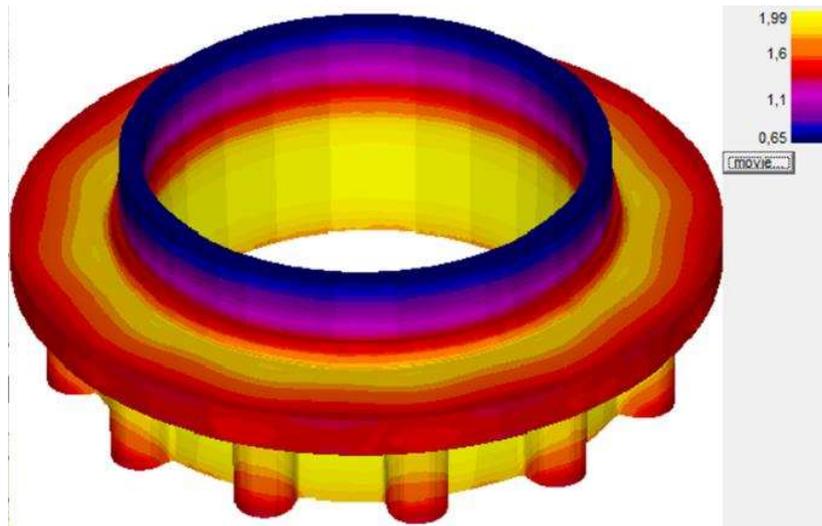


Figura 10 - Resultado do parâmetro do módulo térmico da simulação em vazio.

Podemos verificar na Figura 10 que a zona quente da peça se encontra na base e no interior da peça, indicado pelo maior módulo térmico, a amarelo. Demonstra ainda, mais uma vez, que o topo da flange não necessita de alimentação, devido ao baixo valor de módulo apresentado.

#### 4.2. MODELO ATUAL

Tendo em conta os resultados da simulação em vazio, a empresa determinou, no passado, a utilização de 2 tipos de arrefecedores: arrefecedores interiores e arrefecedores de base. Os arrefecedores têm a função de arrefecerem o alumínio vazado mais rapidamente que a areia, prevenindo diversos defeitos, nomeadamente porosidade na peça, como analisado no Capítulo 2.4.2. Deste modo, os arrefecedores na base foram utilizados de modo a baixar os valores altos de módulo térmico, como sugere a Figura 10 no Capítulo 4.1.

Assim, a empresa optou por usar um modelo apresentado na Figura 11.

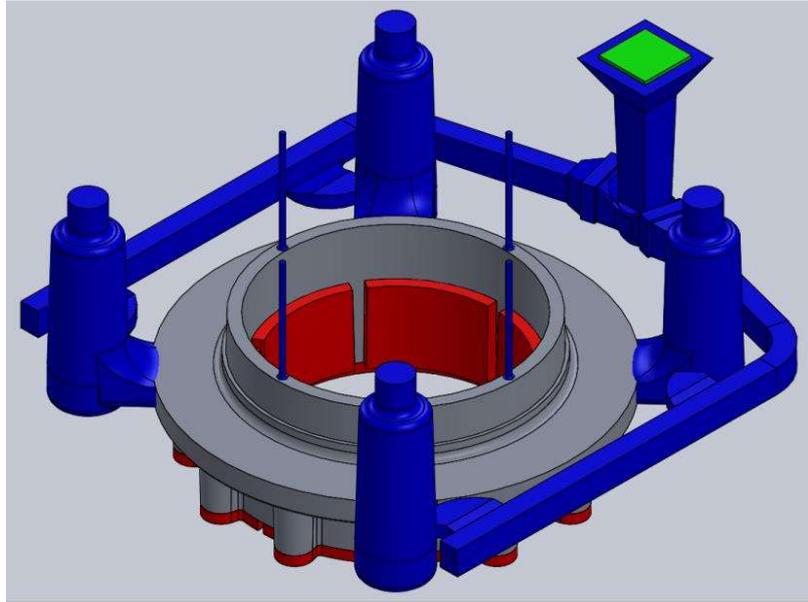


Figura 11 - Modelo de gitagem e alimentação atualmente utilizado na empresa.

Este modelo apresenta 4 alimentadores, de diâmetro 100mm e uma altura de 300mm, os quais alimentam a flange na zona lateral de maior diâmetro. Este modelo contém ainda um gito de descida com uma base de 45 por 45mm, comum na empresa. Foi utilizado um filtro para cada um dos dois canais de distribuição de dimensões 40 por 30mm. No topo da peça foram colocados 4 respiros com um diâmetro de 8mm. Por fim, e como mencionado anteriormente, são utilizados 6 arrefecedores interiores e ainda 4 arrefecedores de base, estes últimos personalizados à base da flange. Todos os arrefecedores têm uma espessura de 16mm.

Na Figura 12 estão presentes os parâmetros utilizados na simulação do modelo de produção atual da empresa.

Material Properties		Mesh		Mold Settings	
Thermal Conductivity	Al 356.0	W/m-K	Mesh Name	Mesh 1	
Specific Heat	159.12	J/kg-k	Number of Nodes		
Density	962.3	kg/m <sup>3</sup>	Node Size	3,5	mm
Initial Temperature	2684.62	C	Mold Type	Rectangular	
Solidification Temperature	730	C	Mold Material	Silica Sand	
Freezing Range	542	C	Mold Thickness	50	(mm)
Latent Heat of Fusion	71	C	<input checked="" type="checkbox"/> Mold Open Top		
Ambient Temperature	388175.1	J/kg	Al 356.0	42,412	Kg
Pour Time	25	sec	Riser	32,333	Kg
	40	sec	Fill Material	,058	Kg
			Silica Sand	466,914	Kg
			Iron Chill	26,695	Kg

Figura 12 - Parâmetros da simulação do modelo atual [22].

Como mostra a Figura 12, a simulação utiliza os parâmetros de 730°C e 40 segundos para o vazamento do alumínio. Foi utilizada uma malha de 3,5mm, o que resulta num

rendimento de aproximadamente 57%, ao ter pouco mais de 32kg para os sistemas de gitagem e alimentação.

Na Figura 13, é apresentado o resultado do parâmetro da densidade do material.

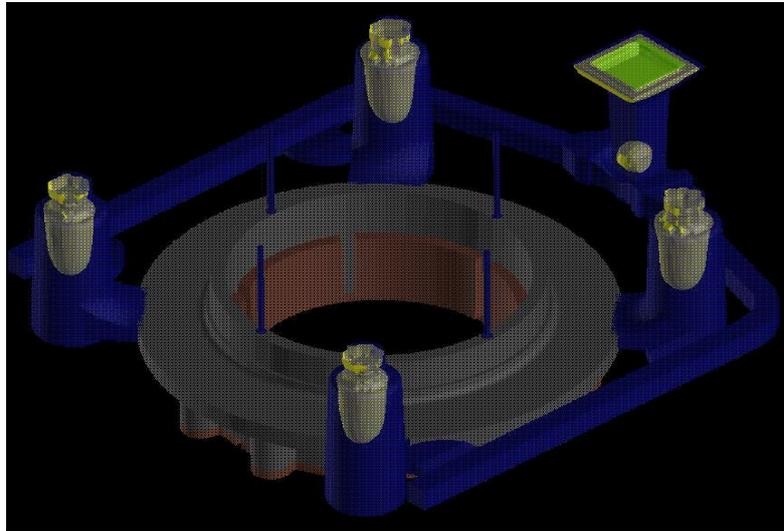


Figura 13 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação do modelo atual.

Na Figura 13, é possível confirmar que não é previsto zonas com macrorrechupe na flange, e, conseqüentemente, não deve apresentar macroporosidade após a solidificação. De constatar a presença de zonas com macroporosidade apenas nos topos dos alimentadores e no gito de descida. Porém, também se constata a existência de zonas nos alimentadores em que o metal disponível não foi utilizado, levando à sugestão que os alimentadores estão sobredimensionados.

Na Figura 14 é apresentado o resultado da simulação relativamente ao parâmetro do critério de Niyama.

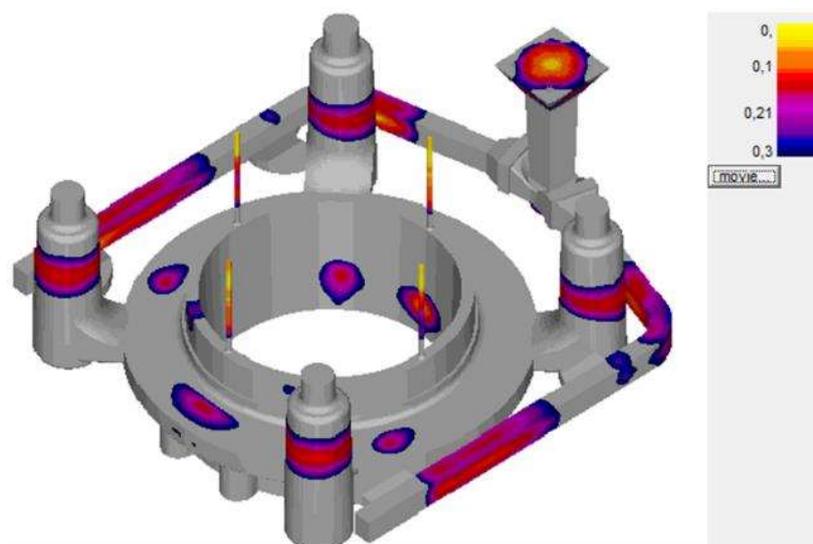


Figura 14 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação do modelo atual.

Segundo Figura 14, é possível verificar que podem existir pequenas zonas na parte central, propícias à existência de microporosidade, assim como na aba junto aos alimentadores opostos ao gito de descida.

O ensaio físico desta peça reuniu os seguintes parâmetros:

- Temperatura do alumínio no forno:  $\approx 753^{\circ}\text{C}$ ;
- Temperatura do alumínio na colher:  $\approx 733^{\circ}\text{C}$ ;
- Densidade do alumínio  $2,6711 \text{ g/cm}^3$ ;
- Tempo de vazamento: 42 segundos.

Após a desmoldação, limpeza e pré-maquinação, a peça final, apresentada na Figura 15, revela uma “pele” brilhante, sem defeitos perceptíveis a olho nu, e dentro das dimensões do desenho técnico.

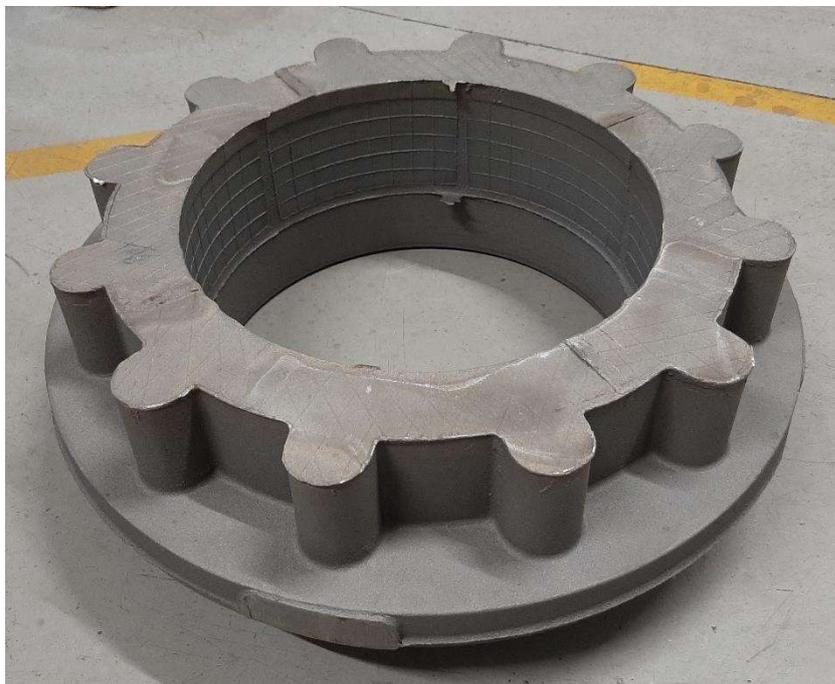


Figura 15 - Flange após limpeza e pré-maquinação.

De seguida, na Figura 16 são apresentadas duas zonas diferentes da peça, provenientes do ensaio não destrutivo de raio-X. A peça em questão já foi maquinada, evidenciada pela presença furos.

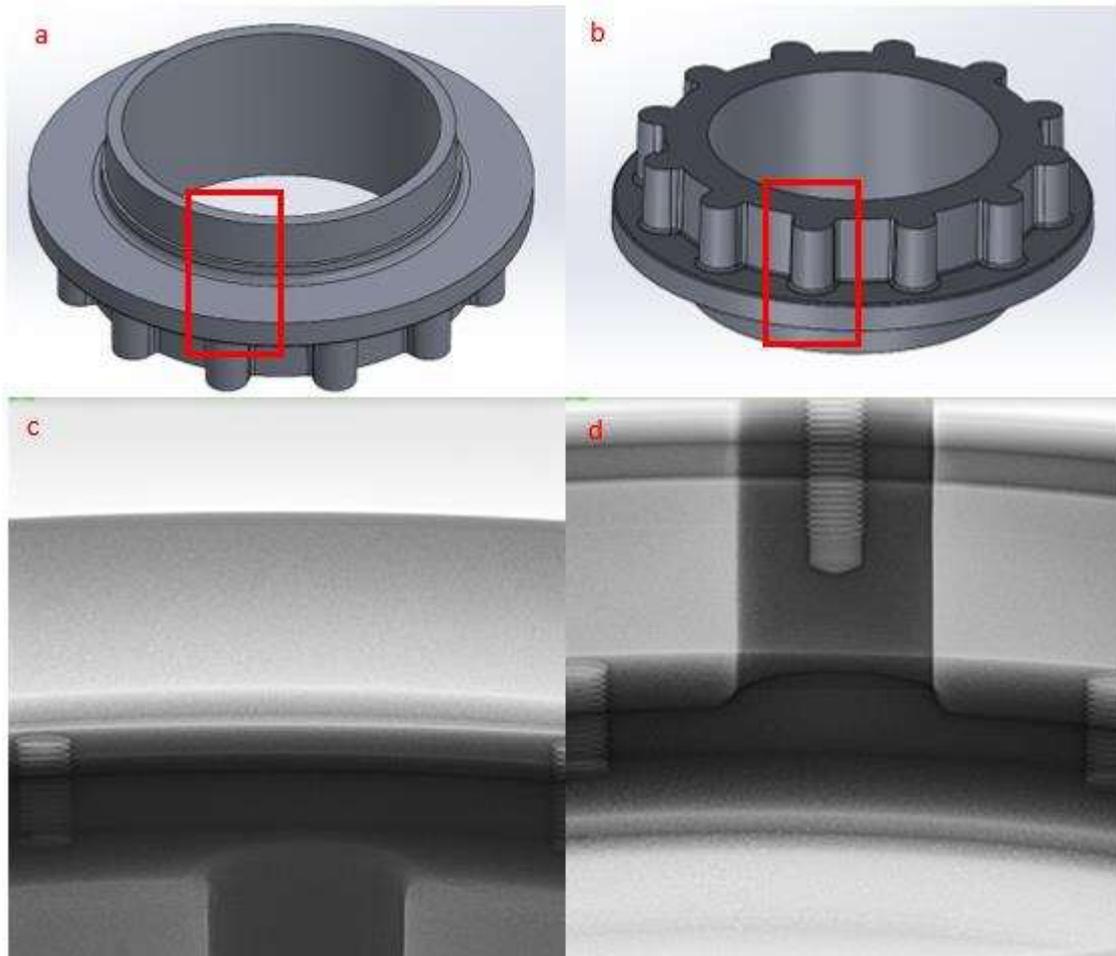


Figura 16 - Resultado do ensaio de raio-X para a flange vazada pelo modelo atualmente em produção na empresa onde: a) indicação da zona vista ao raio-X na imagem c (topo da peça); b) indicação da zona vista ao raio-X na imagem d (base da peça); c) radiografia ao topo da flange; d) radiografia à base da flange.

Na Figura 16a está representada a zona superior da peça. É possível verificar que a imagem aparece homogênea, sem a presença de manchas escuras e/ou claras, o que indica que a zona do topo encontra-se sã. Na Figura 16b está representada a zona correspondente à base da peça. Constata-se que também esta zona apresenta uma região uniforme, sem qualquer tipo de mancha que indique defeitos na peça. É possível assim verificar que a flange está sã e sem a presença de porosidades ou inclusões.

Apesar do resultado da Figura 14, relativa ao critério de Niyama, mostrar zonas propícias a originar microrrechupe, não se verifica tais zonas, como mencionado anteriormente.

Tendo em conta que a peça se encontra sem porosidade, comprovada pelo ensaio físico, e a sugestão da Figura 13 que os alimentadores estão sobredimensionados, deve-se rever a alimentação da flange.

Outros resultados provenientes desta simulação podem encontrar-se no Anexo A.

#### 4.3. PROPOSTA 1

Partindo do modelo atualmente utilizado na empresa, foi aplicados os critérios de módulo (à zona de maior módulo térmico na flange) e de volume.

De modo a calcular o critério, foi utilizada a Equação I. Considera-se o valor do módulo térmico observado na Figura 10 de 1,99 cm, o fator de liga 1,4 e o fator de posição 1. É obtido um valor de 2,8. Considerando que iremos promover a utilização de camisas, deve-se utilizar uma camisa KS3, com o módulo correspondente a alimentadores com um diâmetro de 80 mm [23].

Através do critério do volume, foi utilizada a Equação III. A peça apresenta um volume de 15800 cm<sup>3</sup>, e uma vez que iremos considerar 4 alimentadores, cada um destes irá alimentar um volume de 3950 cm<sup>3</sup>. Em relação ao rendimento da geometria dos alimentadores, a empresa aconselha a utilizar um valor conservador de 0,5, ao contrário dos 0,67 apresentados pela bibliografia. Por último, utilizou-se um valor de 0,05 para a contração, valor utilizado pela empresa. Assim, foi obtido um volume de alimentador de 439 cm<sup>3</sup>. Para obter o diâmetro do alimentador através do critério do volume, utiliza-se no fim a Equação IV e considerou-se um valor da constante de 1,8. Assim, obtemos um valor de 7,19 cm.

Posto isto, ambos os critérios apontam para a utilização de alimentadores de 80 mm e a utilização de camisas. Foram efetuadas as seguintes mudanças:

- Alterar as dimensões dos alimentadores (para um diâmetro de 80mm). Deve também permitir a colocação de camisa isolante e exotérmica;
- A presença de quatro camisas, uma por alimentador;
- Modificação do ataque à peça para os novos alimentadores.

A Figura 17 apresenta o modelo de gitagem e de alimentação da flange com as modificações descritas anteriormente.

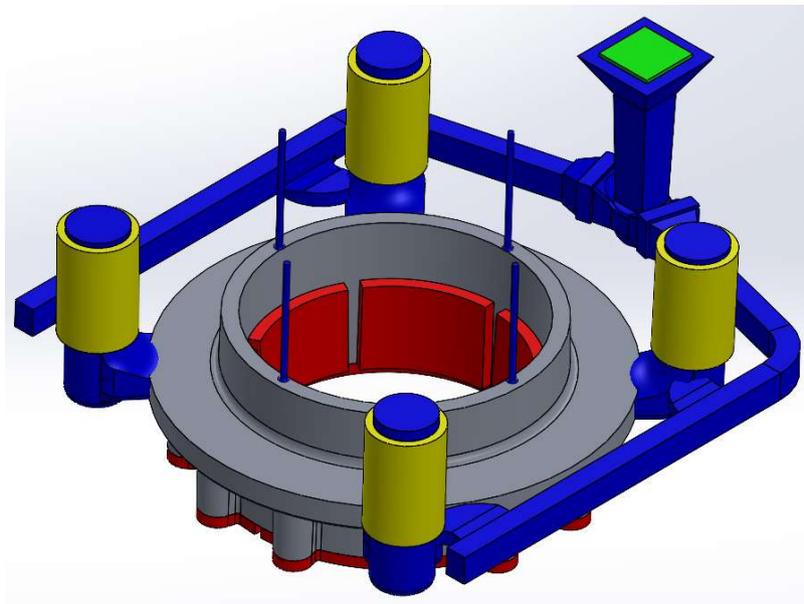


Figura 17 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 1.

Na Figura 18 estão presentes os parâmetros utilizados na simulação do modelo presente na Figura 17.

	Al 356.0	Mesh Name	Mesh 1
Thermal Conductivity	159,12	W/m-K	
Specific Heat	962,3	J/kg-k	
Density	2684,62	kg/m <sup>3</sup>	
Initial Temperature	730	C	
Solidification Temperature	542	C	
Freezing Range	71	C	
Latent Heat of Fusion	388175,1	J/kg	
Ambient Temperature	25	C	
Pour Time	40	sec	

<input type="radio"/> Number of Nodes		3	mm
<input checked="" type="radio"/> Node Size		3	mm

Mold Type	Mold Material	Mold Thickness
Rectangular	Silica Sand	25.4 (mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Mold Open Top		

Al 356.0	43.036 Kg
Riser	25.589 Kg
Fill Material	.102 Kg
Silica Sand	387.204 Kg
Iron Chill	27.109 Kg
Exo Sleeve	.811 Kg

Figura 18 - Parâmetros da simulação da Proposta 1.

As variáveis de temperatura e tempo de vazamento desta simulação são iguais ao modelo atual da empresa. A malha utilizada é de 3mm, permitindo assim mais detalhe no malhamento da peça e dos sistemas de gítagem e alimentação. Em contraste com o modelo atual, esta proposta apresenta um rendimento melhor, de aproximadamente 63%, permitindo uma poupança de alumínio de quase 7kg. Porém, esta proposta utiliza quatro camisas nos alimentadores.

Na Figura 19, é apresentado o resultado da simulação, relativo ao parâmetro da densidade do material.

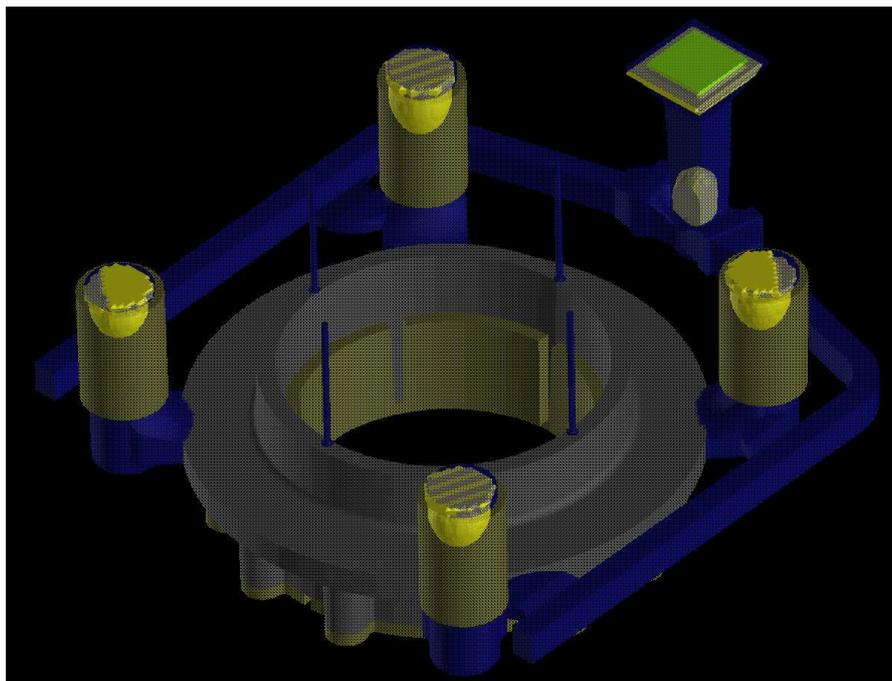


Figura 19 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 1.

Na Figura 19, é possível confirmar que não há previsão de formação de macroporosidade na peça. No entanto, existe a presença de zonas menos densas, nomeadamente nos topos dos alimentadores e no gito de descida, os quais não influenciam a sanidade da peça.

Na Figura 20 é apresentado o resultado da simulação relativamente ao parâmetro do critério de Niyama.

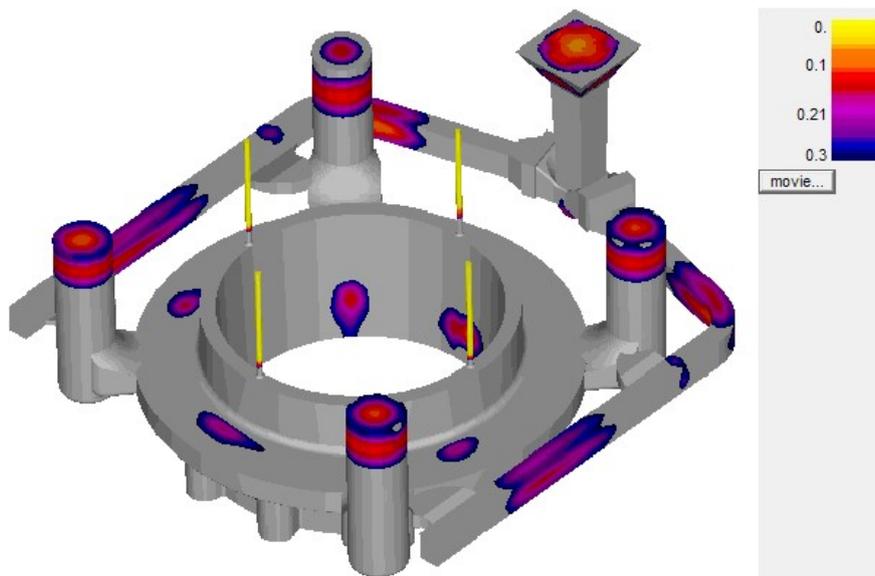


Figura 20 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 1.

Segundo a Figura 20, é possível verificar que podem existir pequenas zonas propícias à existência de microporosidade, principalmente as manchas na zona central. No entanto, e comparativamente ao modelo atual da empresa, esta proposta aparenta ter menos regiões afetadas, assim como de menor área.

O ensaio físico desta peça fez-se com os seguintes parâmetros:

- Temperatura do alumínio no forno:  $\approx 765^{\circ}\text{C}$ ;
- Temperatura do alumínio na colher:  $\approx 735^{\circ}\text{C}$ ;
- Densidade do alumínio  $2,6714 \text{ g/cm}^3$ ;
- Tempo de vazamento: 34 segundos.

Após a desmoldação, limpeza e acabamentos, a peça final revelou uma “pele” brilhante, sem defeitos perceptíveis a olho nu, e dentro das dimensões do desenho técnico.

De seguida, são apresentadas duas perspetivas diferentes, provenientes do ensaio não destrutivo de raio-X e apresentadas na Figura 21. Uma vez que esta peça não foi submetida à maquinação das suas superfícies, observa-se ainda as marcas provenientes dos arrefecedores utilizados.

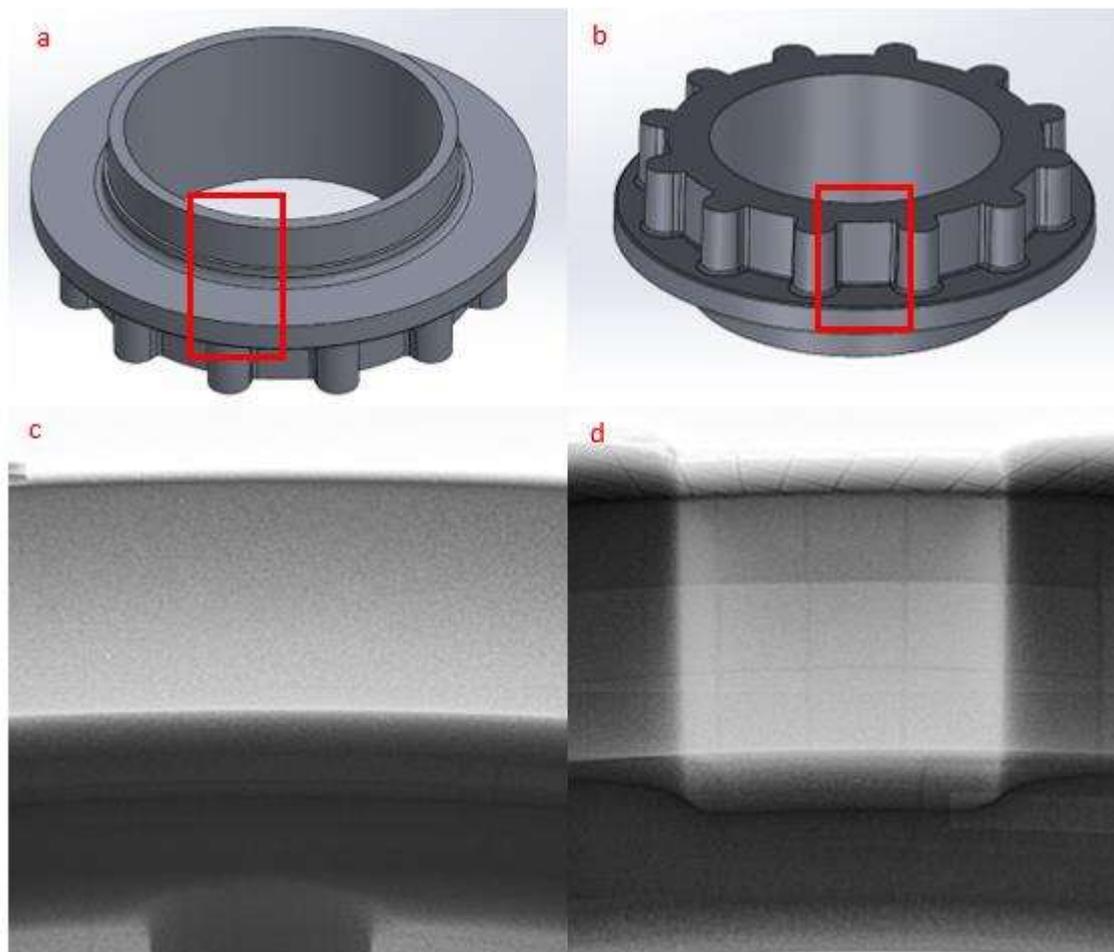


Figura 21 - Resultado do ensaio de raio-X para a flange vazada pelo modelo da Proposta 1, onde: a) indicação da zona vista ao raio-X na imagem c (topo da peça); b) indicação da zona vista ao raio-X na imagem d (base da peça); c) radiografia ao topo da flange; d) radiografia à base da flange.

Na Figura 21a está representada a zona superior da peça. É possível verificar que a imagem aparece homogênea, sem a presença de manchas escuras e/ou claras, o que indica que a zona do topo apresenta-se sã. Na Figura 21b está representada a zona correspondente à base da peça. Constata-se que também esta zona apresenta uma região uniforme, sem qualquer tipo de mancha que indique defeitos na peça. É possível assim verificar que a flange está sã e sem a presença de porosidades ou outros defeitos.

Apesar do resultado da Figura 20, relativa ao critério de Niyama, mostrar zonas propícias a originar microrrechupe, não se verifica tais zonas.

Outros resultados provenientes da simulação desta proposta podem ser encontrados no Anexo B.

#### 4.4. PROPOSTA 2

Tendo em conta o modelo da Proposta 1, foi calculado os critérios de módulo e de volume para a Proposta 2.

De modo a calcular o critério, foi utilizada a Equação I. Considera-se o valor do módulo térmico observado na Figura 10 de 1,99, o fator de liga 1,4 e o fator de posição 1.

É obtido um valor de 2,8. Relembro que o objetivo do trabalho passa por melhorar o rendimento do cacho, e por isso, foi testado a utilização de camisas KS2, o que corresponde a alimentadores com um diâmetro de 60 mm, em vez de 80 mm [23].

Através do critério do volume, foi utilizada a Equação III. A peça apresenta um volume de  $15800 \text{ cm}^3$ , e uma vez que iremos considerar 4 alimentadores, cada um destes irá alimentar um volume de  $3950 \text{ cm}^3$ . Em relação ao rendimento da geometria dos alimentadores, considerou-se o valor de 0,67 apresentado pela bibliografia. Por último, utiliza-se um valor de 0,05 para a contração, valor utilizado pela empresa. Assim, é obtido um volume de alimentador de  $318,5 \text{ cm}^3$ . Para obter o diâmetro do alimentador através do critério do volume, utiliza-se no fim a Equação IV e considerou-se um valor da constante de 1,8. Assim, obtemos um valor de 6,46 cm. Uma vez que estamos a considerar a utilização de camisa, assim como um maior rendimento do alumínio vazado, aproximamos o diâmetro de alimentador para acomodar camisas de diâmetro 6 cm.

Posto isto, ambos os critérios apontam para a utilização de alimentadores de 60 mm e a utilização de camisas. Foram efetuadas as seguintes alterações:

- Alterar as dimensões dos alimentadores (para um diâmetro de 60mm). Deve também permitir a colocação de camisa isolante e exotérmica;
- A presença de quatro camisas exotérmicas, uma por alimentador;
- Reduzido o comprimento dos canais para uma melhor ligação aos alimentadores.

A Figura 22 apresenta o modelo de gitagem e de alimentação da flange com as modificações descritas anteriormente.

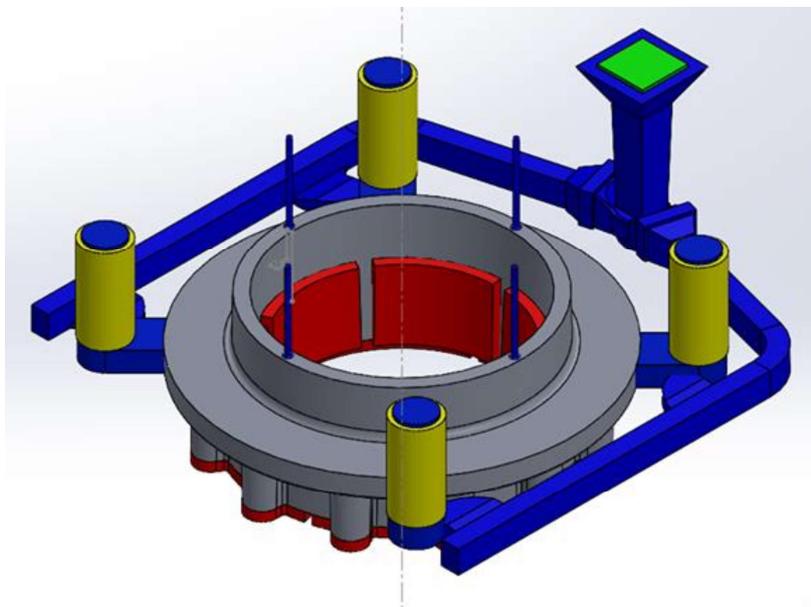


Figura 22 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 2.

Na Figura 23 estão presentes os parâmetros utilizados na simulação do modelo presente na Figura 22.

Thermal Conductivity	Al 356.0		Mesh Name	Mesh 1
	159.12	W/m-K	<input type="radio"/> Number of Nodes <input checked="" type="radio"/> Node Size: 3 mm	
Specific Heat	962.3	J/kg-k	Mold Type	Rectangular
Density	2684.62	kg/m <sup>3</sup>	Mold Material	Silica Sand
Initial Temperature	730	C	Mold Thickness	25.4 (mm)
Solidification Temperature	542	C	<input checked="" type="checkbox"/> Mold Open Top	
Freezing Range	71	C	Al 356.0	43,241 Kg
Latent Heat of Fusion	388175.1	J/kg	Riser	17,571 Kg
Ambient Temperature	25	C	Fill Material	,051 Kg
Pour Time	40	sec	Silica Sand	418,58 Kg
			Iron Chill	24,141 Kg
			Exo Sleeve	,423 Kg

Figura 23 - Parâmetros da simulação da Proposta 2.

As variáveis de temperatura e tempo de vazamento desta simulação são iguais ao modelo atual da empresa. A malha utilizada é de 3mm, permitindo assim mais detalhe no malhamento da peça e dos sistemas de gitagem e alimentação. Em contraste com o modelo atual, esta proposta apresenta um rendimento de aproximadamente 71%, permitindo uma poupança de alumínio próxima de 15kg, mas com a utilização de quatro camisas.

Na Figura 24, é apresentado o resultado da simulação, relativo ao parâmetro da densidade do material.

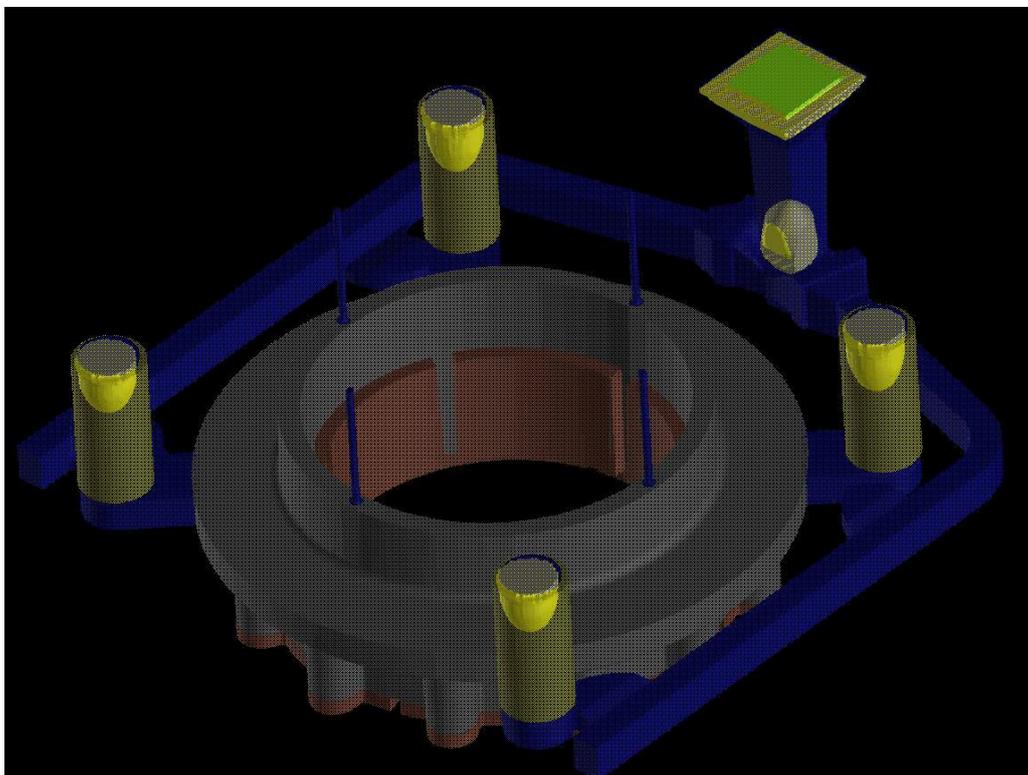


Figura 24 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 2.

Na Figura 24, é possível confirmar que não se perspectiva a formação de macrorrechupe na flange. Consequentemente, não deve apresentar porosidade após a sua solidificação.

Na Figura 25 é apresentado o resultado da simulação relativamente ao parâmetro do critério de Niyama.

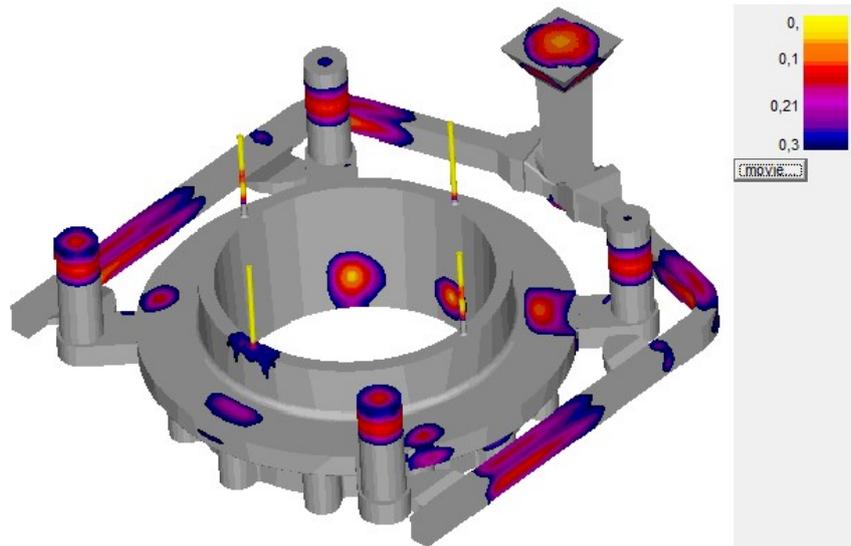


Figura 25 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 2.

Segundo a Figura 25, é possível verificar que podem existir zonas que podem ser propícias à existência de microporosidade, principalmente as manchas na zona central. Comparativamente ao modelo atual da empresa, esta proposta aparenta ser mais suscetível à microporosidade.

Esta proposta não foi ensaiada fisicamente.

Outros resultados provenientes da simulação desta proposta podem ser encontrados no Anexo C.

#### 4.5. PROPOSTA 3

A proposta 3 visou estudar a viabilidade do sistema de gitagem de Campbell aplicado na flange. Tendo em consideração que a Proposta 2 previu uma peça sã com a utilização de alimentadores de diâmetro de 60mm, foi utilizado o seguinte modelo, apresentado na Figura 26.

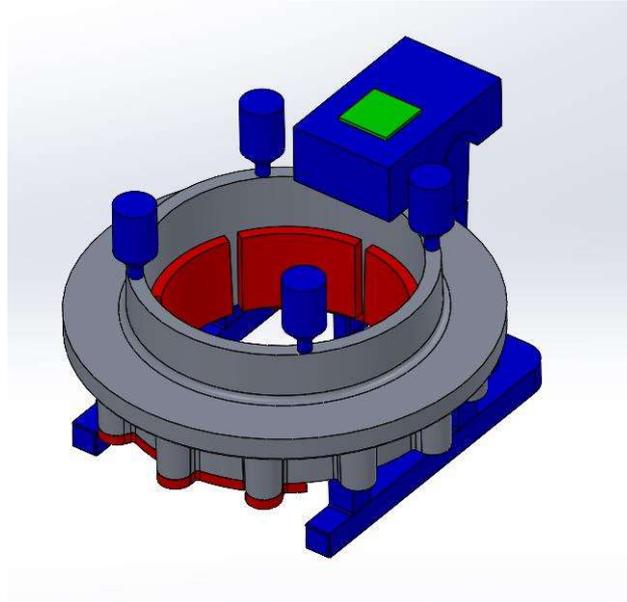


Figura 26 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 3.

Este modelo apresenta uma bacia de vazamento típico do modelo de Campbell. O sistema de gitagem apresenta uma secção uniforme ao longo do seu percurso com um tamanho de 40 por 40mm, alimentando a peça na base, em 4 zonas, permitindo um enchimento em fonte. Uma vez que a peça foi atacada pela base, foi apenas utilizado dois arrefecedores da base. Em relação aos arrefecedores interiores, este foram igualmente utilizados seis na zona interior da peça. A alimentação da peça, por sua vez, utiliza quatro alimentadores frios, no topo da peça, cada uma com um diâmetro de 60mm e uma altura de 120mm. Uma vez que os alimentadores se encontram no topo da peça, esta proposta não contém respiro, ao contrário do modelo atual da empresa.

Na Figura 27 estão presentes os parâmetros utilizados na simulação do modelo atual da empresa.

Material	Al 356.0	Mesh Name	Mesh 2
Thermal Conductivity	159,12	W/m-K	
Specific Heat	962,3	J/kg-k	
Density	2684,62	kg/m <sup>3</sup>	
Initial Temperature	730	C	
Solidification Temperature	542	C	
Freezing Range	71	C	
Latent Heat of Fusion	388175,1	J/kg	
Ambient Temperature	25	C	
Pour Time	40	sec	
		Mesh Settings	
		<input type="radio"/> Number of Nodes	
		<input checked="" type="radio"/> Node Size	3 mm
		Mold Type	Rectangular
		Mold Material	Silica Sand
		Mold Thickness	25.4 (mm)
		<input checked="" type="checkbox"/> Mold Open Top	
		Al 356.0	43.318 Kg
		Riser	20.643 Kg
		Fill Material	.106 Kg
		Silica Sand	293.205 Kg
		Iron Chill	20.12 Kg

Figura 27 - Parâmetros da simulação da Proposta 3.

As variáveis de temperatura e tempo de vazamento desta simulação são iguais ao modelo atual da empresa. A malha utilizada é de 3mm. Esta proposta apresenta um rendimento de aproximadamente 68%, inferior ao da proposta 2, mas superior ao método atual.

Na Figura 28, é apresentado o resultado da simulação, relativo ao parâmetro da densidade do material.

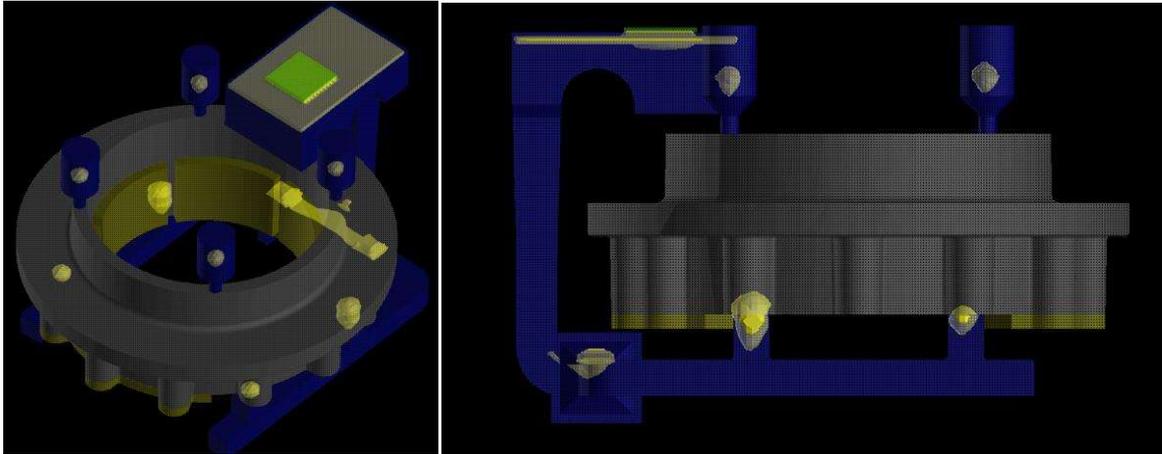


Figura 28 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 3.

Na Figura 28, é possível verificar que existem zonas da peça que são propícias à formação de macrorrechupes, nomeadamente nos quatro ataques à peça. Assim, prevê-se porosidade nestas zonas, comprometendo a sanidade da peça.

Na Figura 29 é apresentado o resultado da simulação relativamente ao parâmetro do critério de Niyama.

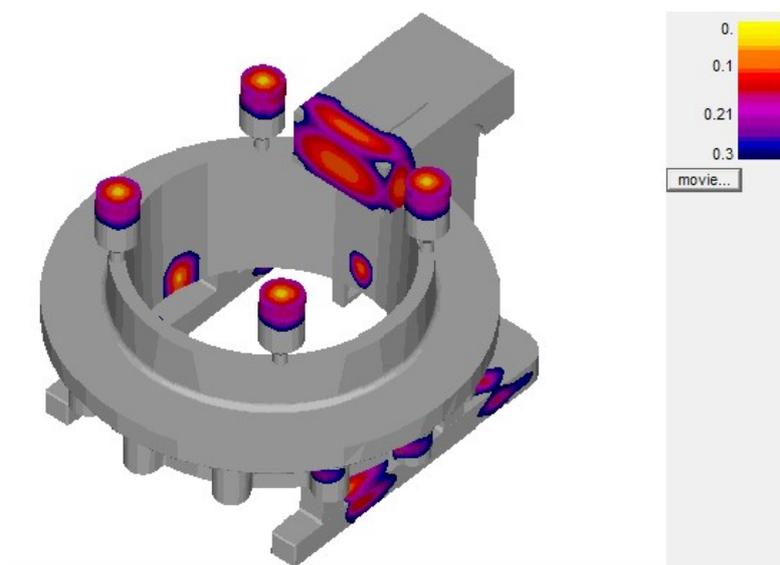


Figura 29 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 3.

Segundo Figura 29, é possível verificar que podem existir zonas que podem ser propícias à existência de microporosidade. Estas manchas situam-se no interior da peça,

assim como na zona dos ataques. Comparativamente ao modelo atual da empresa, esta proposta aparenta ter menos zonas, mas mais suscetível à microporosidade, pois apresenta valores maiores.

Esta proposta não foi ensaiada fisicamente.

Outros resultados provenientes da simulação desta proposta podem ser encontrados no Anexo D.

#### 4.6. PROPOSTA 4

Tendo em conta a proposta 2, foram efetuadas as seguintes mudanças:

- Foi considerada uma temperatura de vazamento de 730°C;
- Foi considerado um tempo de vazamento de 44 segundos.

A Figura 30 apresenta o modelo de gitagem e de alimentação da flange com as modificações descritas em cima.

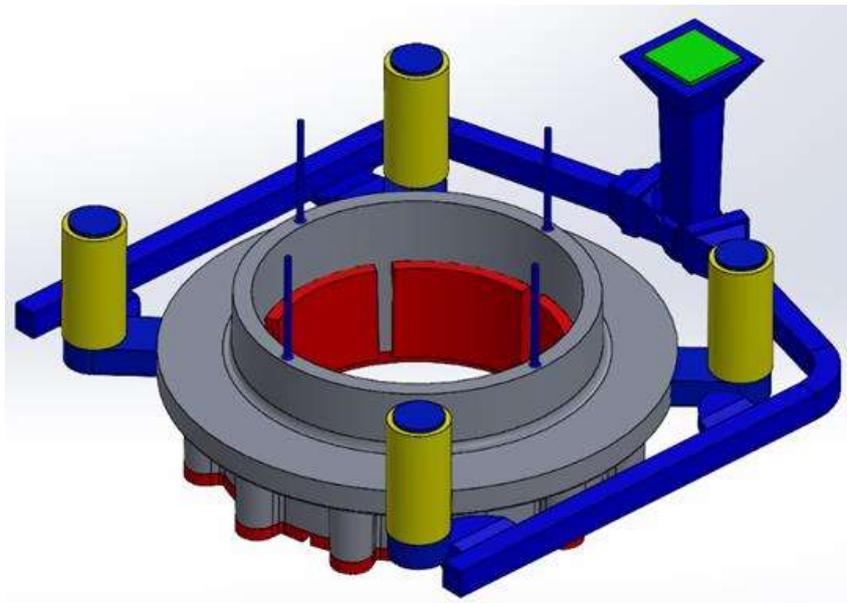


Figura 30 - Modelo de gitagem e alimentação da Proposta 4.

Na Figura 31 estão presentes os parâmetros utilizados na simulação do modelo presente na Figura 30.

	Al 356.0		Mesh Name	Mesh 1
Thermal Conductivity	159.12	W/m-K	<input type="radio"/> Number of Nodes <input checked="" type="radio"/> Node Size <input type="text" value="3"/> mm	
Specific Heat	962.3	J/kg-k	Mold Type	Rectangular
Density	2684.62	kg/m <sup>3</sup>	Mold Material	Silica Sand
Initial Temperature	730	C	Mold Thickness	25.4 (mm)
Solidification Temperature	542	C	<input checked="" type="checkbox"/> Mold Open Top	
Freezing Range	71	C	Al 356.0	43.241 Kg
Latent Heat of Fusion	388175.1	J/kg	Riser	17.154 Kg
Ambient Temperature	25	C	Fill Material	.051 Kg
Pour Time	44	sec	Silica Sand	418.816 Kg
			Iron Chill	24.141 Kg
			Exo Sleeve	.423 Kg

Figura 31 - Parâmetros da simulação da Proposta 4.

Mais uma vez foi utilizada uma malha de 3mm. Esta proposta possui um rendimento perto de 72%. Isto representa um aumento de 15% de rendimento e uma redução superior a 15 kg de alumínio no sistema de alimentação e gitagem, quando comparado com o modelo atual da empresa.

Na Figura 32, é apresentado o resultado da simulação, relativo ao parâmetro da densidade do material.

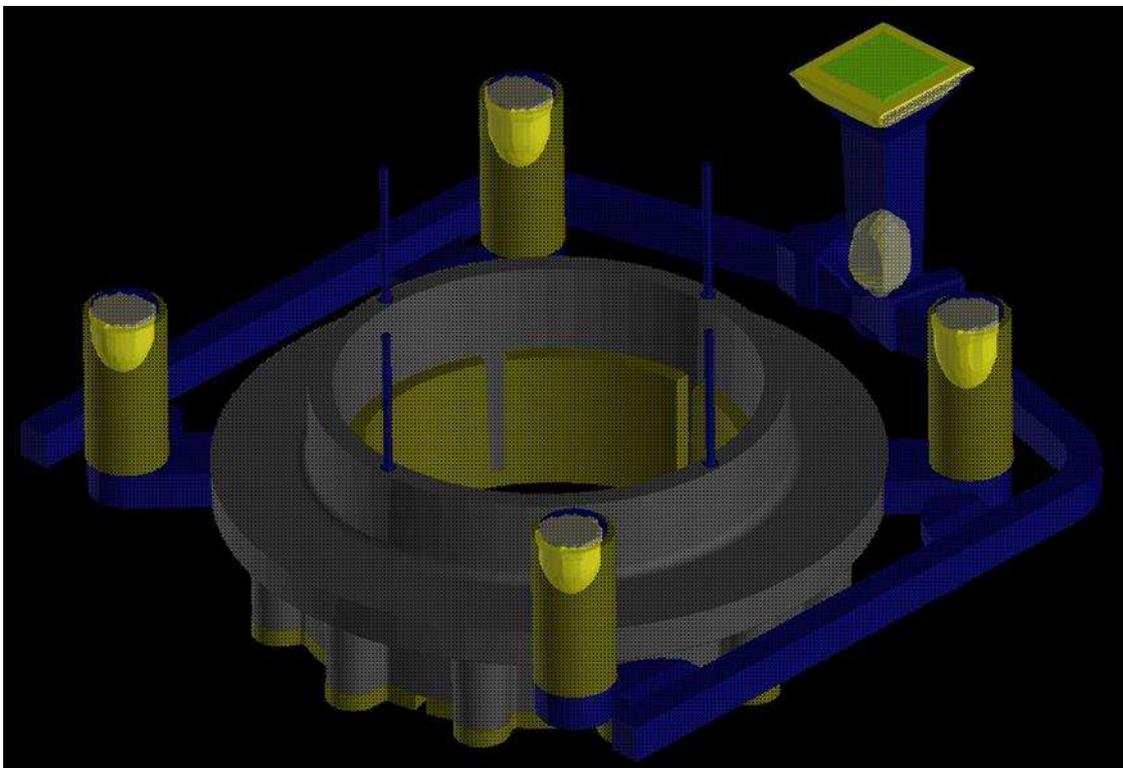


Figura 32 - Resultado do parâmetro da densidade do material da simulação da Proposta 4.

Na Figura 32, é possível confirmar que não há previsão de formação de macrorrechupe na flange, prevendo que não apareça porosidade após a sua solidificação e provavelmente são. No entanto, existe a presença de zonas menos densas, nomeadamente nos topos dos alimentadores e no gito de descida.

Na Figura 33 é apresentado o resultado da simulação relativamente ao parâmetro do critério de Niyama.

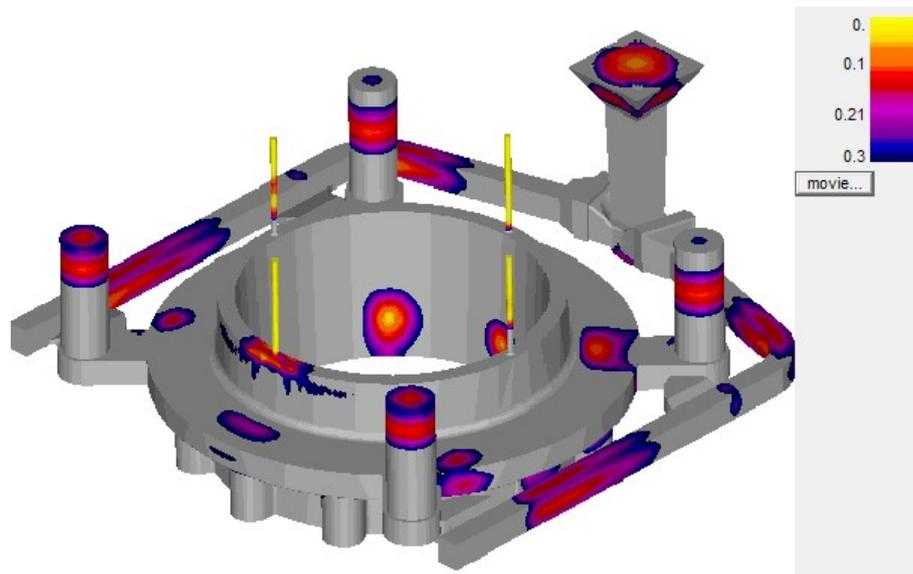


Figura 33 - Resultado do parâmetro do critério de Niyama da simulação da Proposta 4.

Segundo Figura 33, é possível verificar que podem existir zonas que podem ser propícias à existência de microporosidade, especialmente o ponto na zona central, que apresenta um valor muito baixo.

Na Figura 34 são apresentadas duas perspetivas diferentes, provenientes do ensaio não destrutivo de raio-X. Uma vez que esta peça não foi maquinada, observa-se ainda as marcas provenientes dos arrefecedores utilizados.

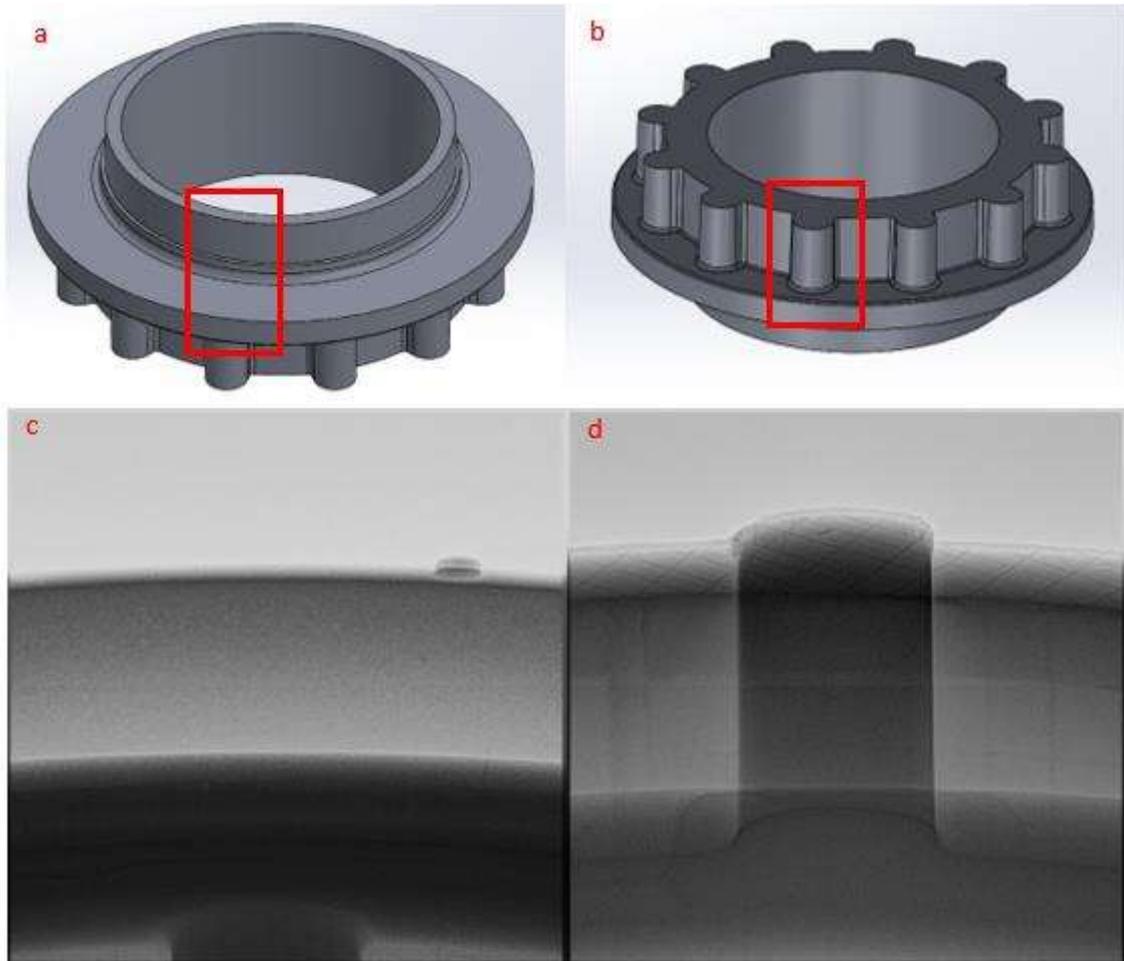


Figura 34 - Resultado do ensaio de raio-X para a flange vazada pelo modelo da Proposta 4, onde: a) indicação da zona vista ao raio-X na imagem c (topo da peça); b) indicação da zona vista ao raio-X na imagem d (base da peça); c) radiografia ao topo da flange; d) radiografia à base da flange.

Na Figura 34a está representada a zona superior da peça e verifica-se que a parede da peça apresenta-se numa tonalidade homogénea, sem a presença de manchas escuras e/ou claras, permitindo assumir que a zona do topo apresenta-se sã. A zona mais escura no topo da peça corresponde a um respiro que não foi removido na totalidade. Na Figura 34b está representada a zona correspondente à base da peça e constata-se que também esta zona apresenta uma região uniforme, sem qualquer tipo de mancha que indique defeitos na peça. É possível assim verificar que a flange está sã e sem a presença de porosidades ou outros defeitos.

Apesar do resultado da Figura 33, relativa ao critério de Niyama, mostrar zonas propícias a originar microrrechupe, não se verifica tais zonas, como mencionado anteriormente.

Outros resultados provenientes da simulação desta proposta podem ser encontrados no Anexo E.

#### 4.7. Análise económica

Para além do aumento da eficiência do metal vazado, este encontra-se associado a uma diminuição do custo de moldação. De modo a verificar este pressuposto, foram considerados os valores a utilizar pela empresa relativamente aos preços do alumínio e das camisas.

Uma vez que foi reduzido o volume de alumínio utilizado, proporcionalmente houve um aumento da quantidade de areia utilizada. No entanto, uma vez que este volume de areia é quase insignificante a cada moldação produzida, o preço da areia não será tomado em consideração.

Será comparado o preço do modelo atual da empresa e o modelo da proposta 4, o sistema mais eficaz que foi comprovado fisicamente. Para tal, deve-se ter em consideração os preços (praticados pela empresa a 10 de Agosto de 2021):

- Alumínio: 2,5 €/kg;
- Camisas exotérmicas: 0,65€/unidade.

Entre o modelo atual e a proposta 4, verifica uma redução de 15kg de alumínio, o que se pode traduzir numa poupança de 37,7€ por cada peça fabricada. No entanto, no modelo da proposta 4 foram utilizadas 4 camisas exotérmicas, o que origina um custo adicional de 2,6€. Verifica-se assim que o custo de uma moldação poderá ser reduzido em aproximadamente 35,1€.

## 5. CONCLUSÃO

---

Como o principal objetivo deste trabalho foi otimizar o sistema de alimentação na flange, são apontadas as seguintes conclusões:

1. Comparado ao modelo atualmente em operação na empresa, a proposta 4 apresenta uma redução de 15kg, mantendo o nível de sanidade da peça.
2. A proposta 4 apresenta assim um rendimento de sensivelmente 72% enquanto o modelo atual apresenta um rendimento de 57%.
3. Os ensaios de raio-X permitem dizer que a flange produzida pela proposta 4, encontra-se apta para a sua maquinação.
4. Um design correto da alimentação permite uma redução no volume de alumínio utilizado, permitindo assim um aumento de rendimento, sem colocar em risco a sanidade da peça.
5. A proposta 3 (que utiliza o sistema de gitagem de Campbell) não apresenta os resultados desejados, quando comparado com a proposta 2 (apenas a modificação do sistema de alimentação e um pequeno ajuste no sistema de gitagem).
6. Utilizando a proposta 4 em oposição do modelo atual da empresa, verifica-se uma redução de custo por peça fabricada de aproximadamente 35€.

## 6. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

---

O presente trabalho levantou algumas necessidades que podem dar seguimento a trabalhos futuros:

1. Estudar a influência da turbulência do fluxo durante o enchimento da peça. Seria interessante analisar o enchimento das peças com as variáveis apresentadas nas propostas desenhadas para este trabalho.
2. Realização de mais testes experimentais com as variáveis aqui apresentadas para que a amostragem fosse maior e estatisticamente mais completa. Isto iria permitir uma maior credibilidade para os resultados obtidos nas simulações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Firmago. "Firmago." <http://firmago.pt/index.php> (accessed 31/07/2020).
- [2] T. A. Association. "History of Aluminum." <https://www.aluminum.org/aluminum-advantage/history-aluminum> (accessed 02/08/2020).
- [3] B. O. Encyclopedia. "Aluminum." Encyclopaedia Britannica, Inc. <https://www.britannica.com/science/aluminum> (accessed 01/08/2020).
- [4] G. E. Totten and D. S. MacKenzie, "Handbook of Aluminum," in *Physical Metallurgy and Process*, vol. 1: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [5] E. Aluminium. "The Aluminium Effect." <https://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/the-aluminium-effect/> (accessed 02/08/2020).
- [6] M. V. Glazoff, A. Khvan, V. S. Zolotorevsky, N. A. Belov, and A. Dinsdale, *Casting Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Metallurgy*. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [7] A. International, J. R. Davis and D. Associates, Eds. *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International, 1993.
- [8] S. P. Foundry. "A356.0 Aluminum." [https://www.stpaulfoundry.com/AlloySpecs/ally\\_specifications\\_data\\_page.aspx?id=A356.0](https://www.stpaulfoundry.com/AlloySpecs/ally_specifications_data_page.aspx?id=A356.0) (accessed 28/08/2020).
- [9] J. G. Kaufman, E. L. Rooy, and A. F. Society, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. 2004.
- [10] M. Warmuzek, *Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractographs*. ASM International, 2004.
- [11] B. A. Esgandari, B. Nami, M. Shahmiri, and A. Abedi, "Effect of Mg and semi solid processing on microstructure and impression creep properties of A356 alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, doi: 10.1016/S1003-6326(13)62763-6.
- [12] D. W. Schwam, J. F.; Engle, T.; Chang, Q., "Gating of permanent molds for aluminum castings," US Department of Energy, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2172/840927>
- [13] J. Campbell, *Castings*, 2 ed. Elsevier Science Ltd, 2003.
- [14] Finite Solutions. "About us." <https://finite.solutions/About> (accessed 2021/06/26).
- [15] Finite. Solutions. "FLOWCast Unit 1: Overview and Quick Start Guide." <https://finite.solutions/Support/Documentation/FLOWCast/1> (accessed 2021/06/26).
- [16] Finite Solutions. "SOLIDCast Unit 20: Output Criteria: Solidification Time." <https://finite.solutions/Support/Documentation/SOLIDCast/20> (accessed 2021/06/26).
- [17] Finite Solutions. "SOLIDCast Unit 21: Output Criteria: Critical Fraction Solid Time." <https://finite.solutions/Support/Documentation/SOLIDCast/21> (accessed 2021/06/26).

- [18] Finite Solutions. "SOLIDCast Unit 22: Output Criteria: Material Density Function." <https://finite.solutions/Support/Documentation/SOLIDCast/22> (accessed 2021/06/26).
- [19] Finite Solutions. "SOLIDCast Unit 23: Output Criteria: Temperature Gradient." <https://finite.solutions/Support/Documentation/SOLIDCast/23> (accessed 2021/06/26).
- [20] Finite Solutions. "SOLIDCast Unit 24: Output Criteria: Cooling Rate." <https://finite.solutions/Support/Documentation/SOLIDCast/24> (accessed 2021/06/26).
- [21] Finite Solutions. "SOLIDCast Unit 25: Output Criteria: The Niyama Criterion." <https://finite.solutions/Support/Documentation/SOLIDCast/25> (accessed 2021/06/26).
- [22] Finite Solutions, "Base de dados do software," ed. SOLIDCast: Finite Solutions.
- [23] Foseco, KALMIN\* S Data Sheet.

## ANEXOS

### Anexo A

No Anexo A são apresentados outros parâmetros da simulação do modelo atual da empresa.

Na Figura 35 e Figura 36 são apresentados os resultados para o tempo de solidificação e do tempo de fração crítica de sólido, respectivamente.

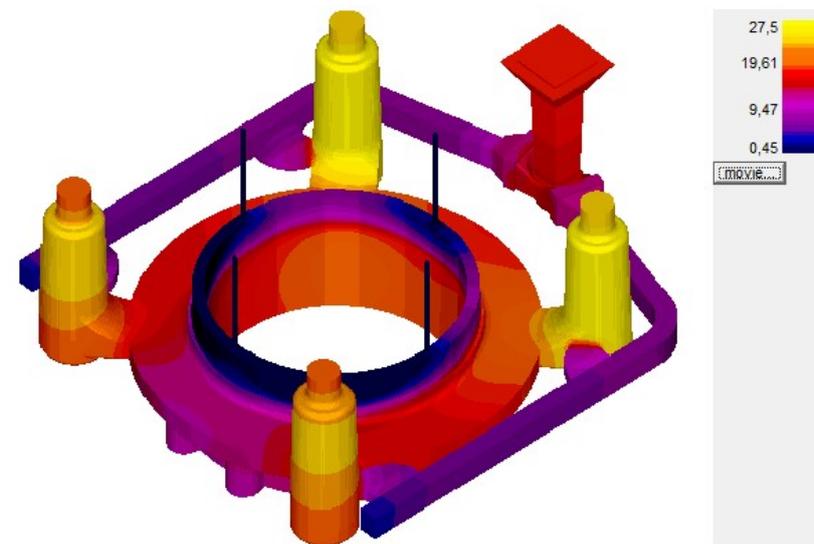


Figura 35 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação do modelo atual.

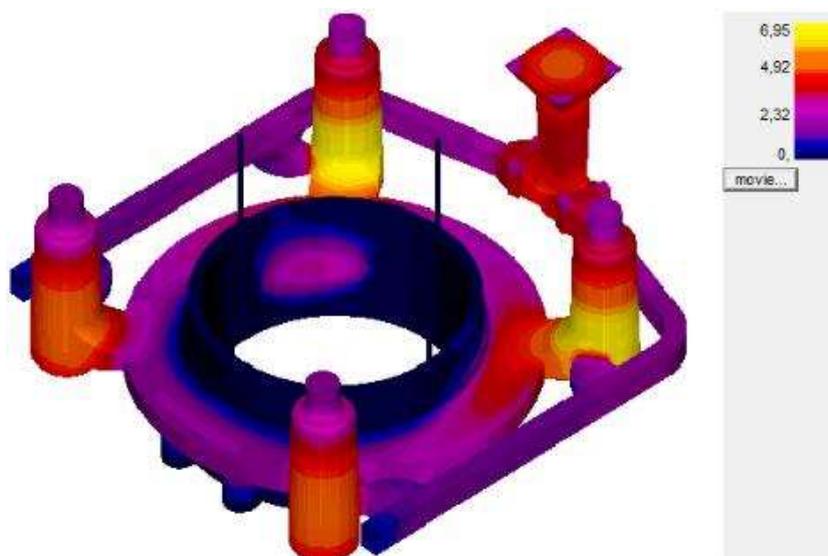


Figura 36 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação do modelo atual.

Na Figura 35 é possível verificar que a flange solidifica ao fim de aproximadamente 20 minutos, enquanto os alimentadores apenas ao fim de pouco mais de 27 minutos, pelo que comprova-se que os alimentadores conseguiram “trabalhar” bem. De notar que a zona da peça junto ao gito de descida solidifica mais lentamente que a zona oposta.

Na Figura 36 é possível apurar que não flui metal na peça menos de 3 minutos após o vazamento, restando apenas fluidez nos alimentadores.

De seguida, é apresentado o resultado do gradiente térmico na Figura 37.

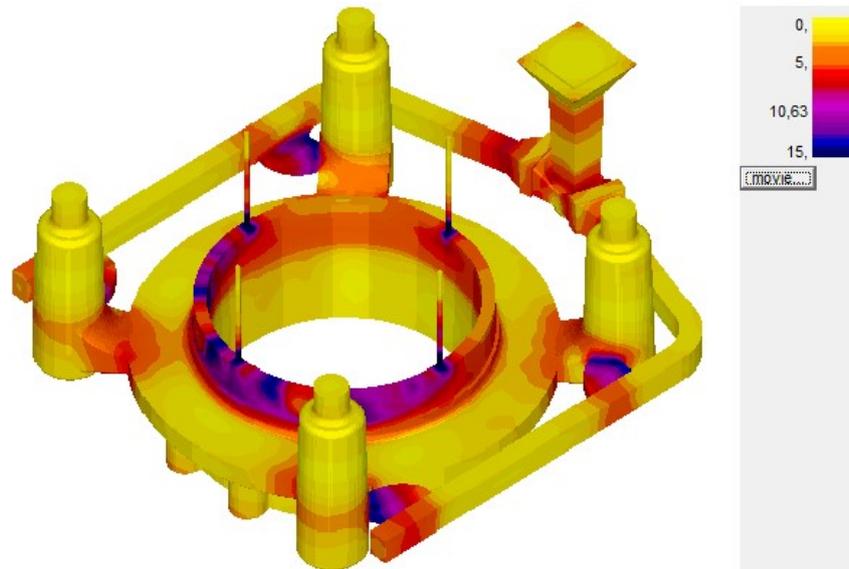


Figura 37 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação do modelo atual.

Na Figura 37, verifica-se que toda a peça tem uma temperatura bastante homogénea por toda a sua extensão, com a exceção da zona superior. Isto pode ser explicado pela presença dos respiros, que arrefecem muito rapidamente, causando assim um forte gradiente térmico entre a zona superior da flange e estes. Existe também um grande gradiente térmico no ataque dos alimentadores e o gito de distribuição, o que pode ser justificado pela pequena área dos ataques, em junção com os alimentadores quentes.

## ANEXO B

No anexo B são apresentados outros parâmetros da simulação do modelo da proposta 1.

Foram obtidos os resultados para o tempo de solidificação e do tempo de fração crítica de sólido, apresentados na Figura 38 e Figura 39, respetivamente.

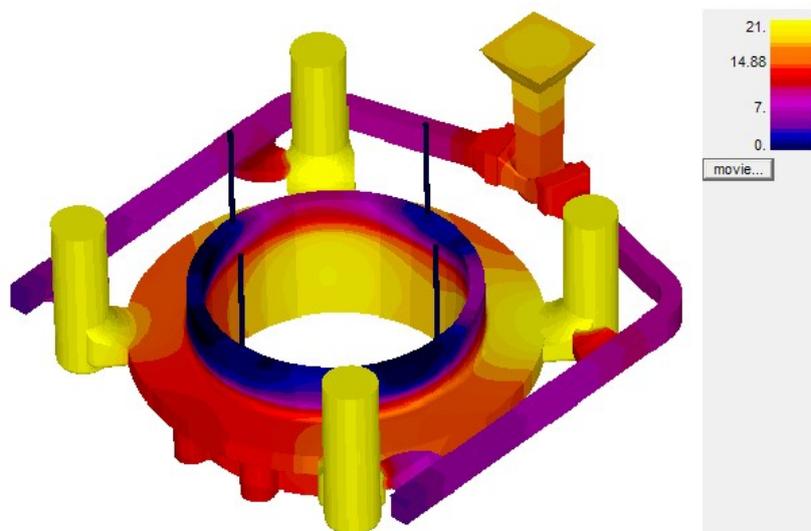


Figura 38 - Resultado do parâmetro do tempo solidificação da simulação da Proposta 1.

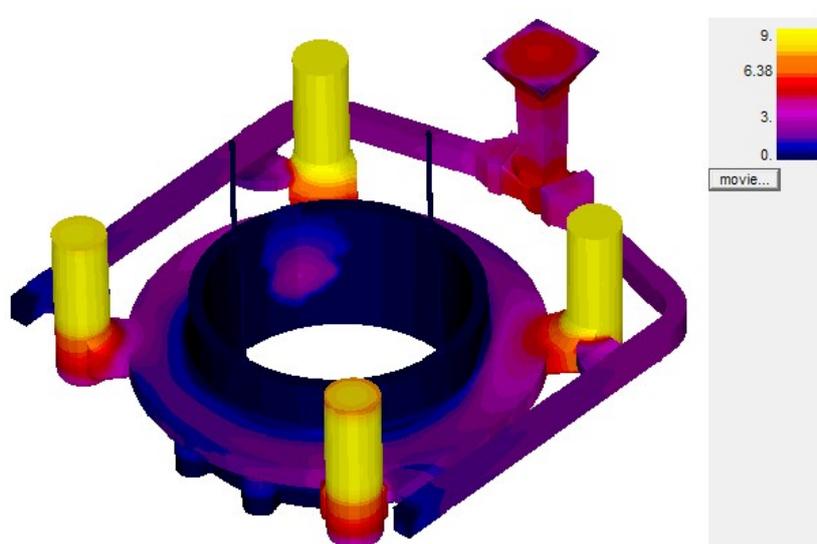


Figura 39 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 1.

Na Figura 38 é possível verificar que a flange solidifica ao fim de aproximadamente 21 minutos, tal como o modelo em produção na empresa. Por sua vez, os alimentadores também arrefeceram após 21 minutos. Uma vez que os alimentadores são de menor dimensão, estes aparentam não “trabalhar” de modo tão eficaz como os do modelo atual da empresa.

Porém, ao analisar a Figura 39, verifica-se que a peça não permite trocas de metal ao fim de 3 minutos, ao contrário dos alimentadores, que apresentam um tempo de sensivelmente 9 minutos. Isto pode ser explicado pela presença de camisa, conservando mais energia, e possibilitando que o banho demore mais tempo a tornar-se pastoso.

De seguida, é apresentado o resultado do gradiente térmico na Figura 40.

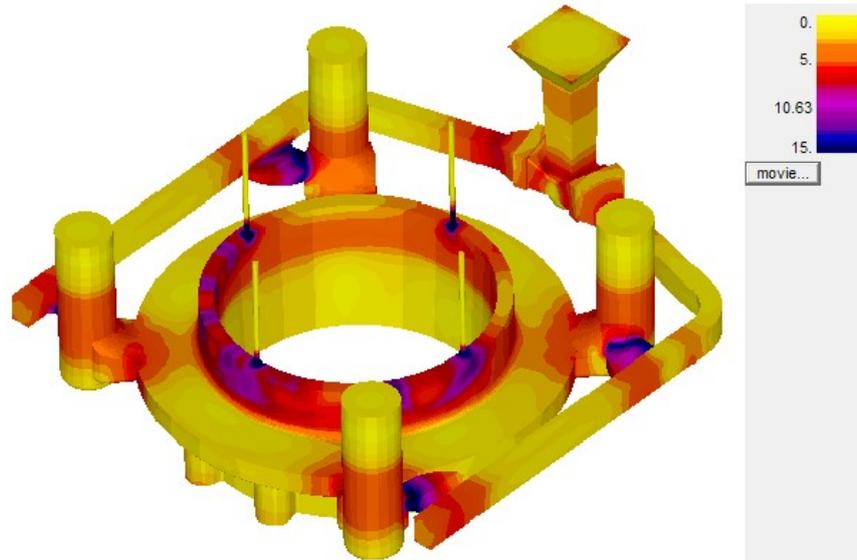


Figura 40 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 1.

Na Figura 40, verifica-se que toda a peça tem uma temperatura bastante homogénea por toda a sua extensão, exceto as zonas superior e de ligação aos alimentadores. Este fenómeno na região superior pode ser explicado pela presença dos respiros, que arrefecem muito rapidamente, causando assim um forte gradiente térmico entre a zona superior da flange e estes. Já as zonas de conexão com os alimentadores podem ser justificadas pela diferença de temperatura entre a peça e os alimentadores.

## ANEXO C

No anexo C são apresentados outros parâmetros da simulação do modelo da proposta 2.

Após a simulação, foram obtidos os resultados para o tempo de solidificação e do tempo de fração crítica de sólido, apresentados na Figura 41 e Figura 42, respetivamente.

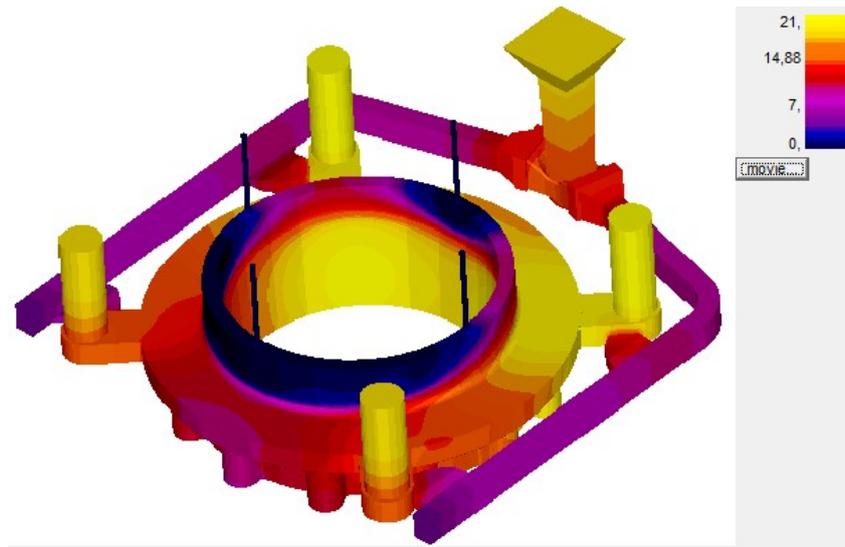


Figura 41 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação da Proposta 2.

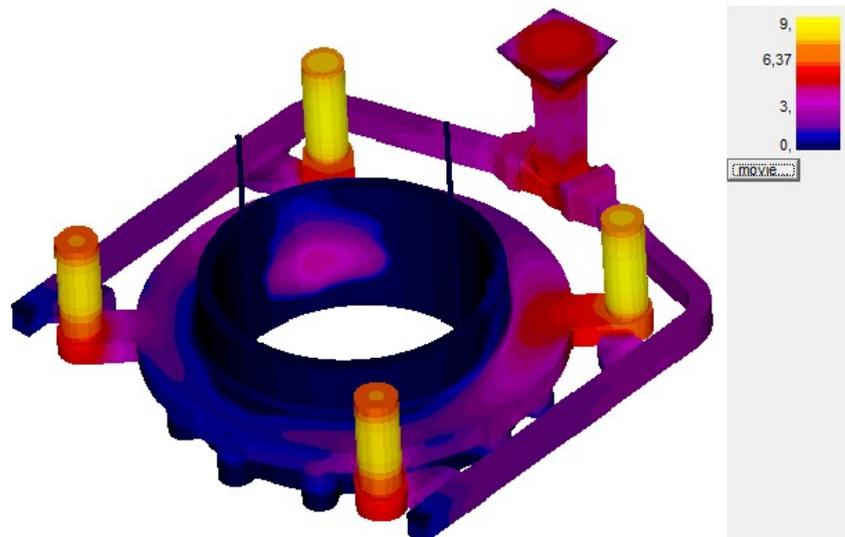


Figura 42 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 2.

Na Figura 41 é possível verificar que a flange solidifica ao fim de aproximadamente 21 minutos. No entanto, os alimentadores arrefeceram também para tempos de 21 minutos. Uma vez que os alimentadores são de menor dimensão, estes aparentam não “trabalhar” de modo tão eficaz como os do modelo atual da empresa.

Porém, ao analisar a Figura 42, verifica-se que a peça não permite trocas de metal ao fim de 3 minutos, ao contrário dos alimentadores, que apresentam um tempo de sensivelmente 9 minutos. Isto pode ser explicado pela presença de camisa, conservando mais energia, e possibilitando que o banho demore mais tempo a tornar-se pastoso.

De seguida, é apresentado o resultado do gradiente térmico na Figura 43.

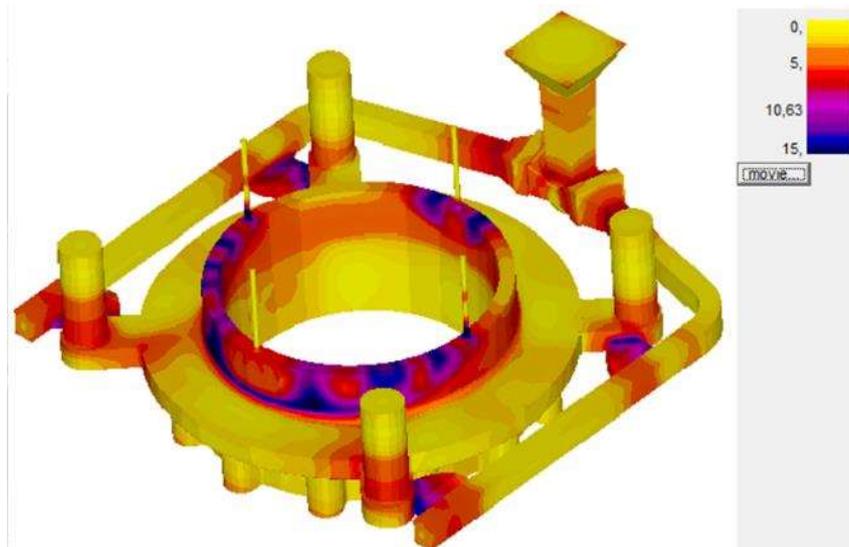


Figura 43 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 2.

Na Figura 43, verifica-se que toda a peça tem uma temperatura bastante homogénea por toda a sua extensão, exceto na zona superior. Isto pode ser explicado pela presença dos respiros, que arrefecem muito rapidamente, causando assim um forte gradiente térmico entre a zona superior da flange e estes. Outra explicação é que esta zona apresenta um tempo de solidificação rápido, em comparação com o resto da peça.

#### ANEXO D

No anexo D são apresentados outros parâmetros da simulação do modelo da proposta 3.

Após a simulação, foram obtidos os resultados para o tempo de solidificação e do tempo de fração crítica de sólido, apresentados na Figura 44 e Figura 45, respetivamente.

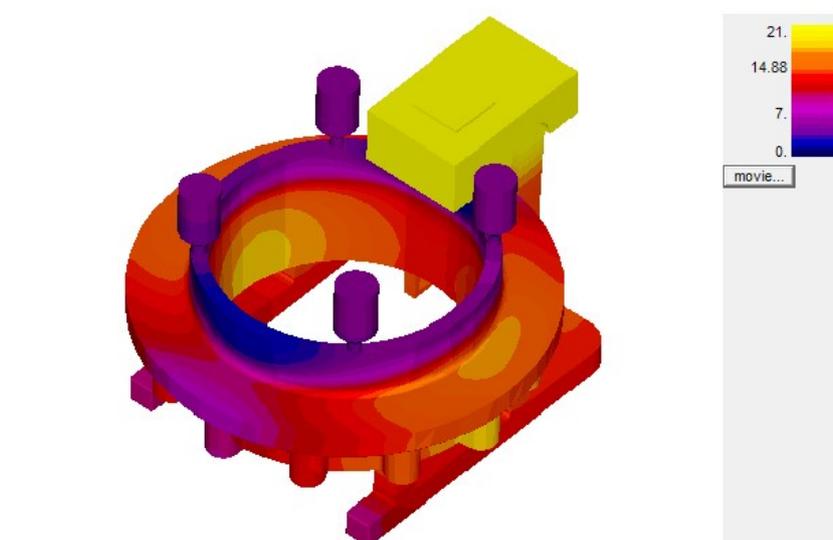


Figura 44 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação da Proposta 3.

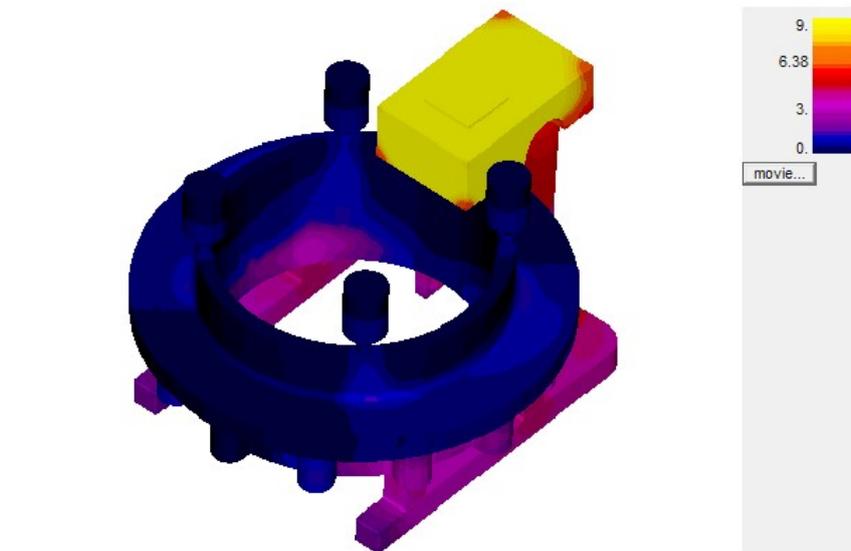


Figura 45 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 3.

Na Figura 44 é possível verificar que as diferentes zonas da flange solidificam momentos distintos. A zona superior da peça solidifica até aos 7 minutos, enquanto a zona lateral da peça vai solidificando até aproximadamente aos 15 minutos. Já o interior da peça apresenta regiões que apenas solidificam ao fim de 21 minutos. Já os alimentadores observar-se que solidificam ao fim de cerca de 7 minutos.

Ao analisar a Figura 45 é possível verificar que a peça não permite trocas de metal ao fim de 1 minuto, com a exceção da zona interior, que apresenta um tempo de 3 minutos. Os alimentadores apresentam também um valor baixo, próximo do 1 minuto.

De seguida, é apresentado o resultado do gradiente térmico na Figura 46.

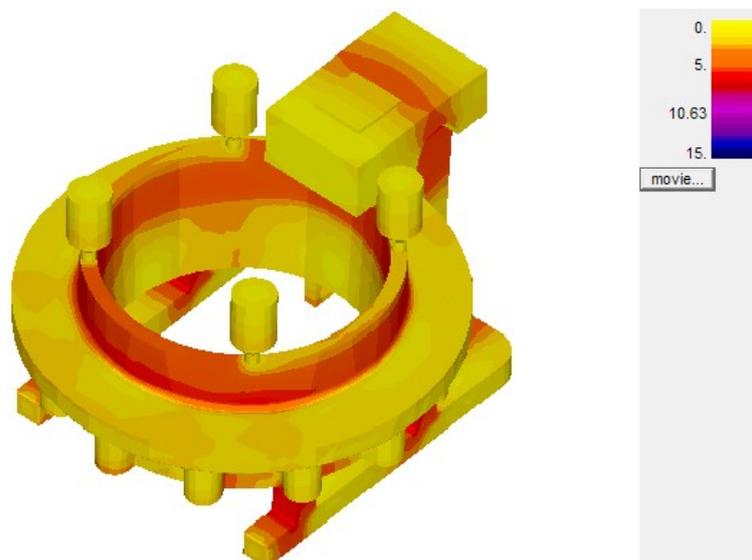


Figura 46 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 3.

Na Figura 46, verifica-se novamente que toda a peça tem uma temperatura bastante homogênea por toda a sua extensão. Apesar de a zona superior apresentar um valor maior, este continua a ser bastante reduzido, inferior a 15°C/cm.

## ANEXO E

No anexo E são apresentados outros parâmetros da simulação do modelo da proposta 4.

Após a simulação, foram obtidos os resultados para o tempo de solidificação e do tempo de fração crítica de sólido, apresentados na Figura 47 e Figura 48, respetivamente.

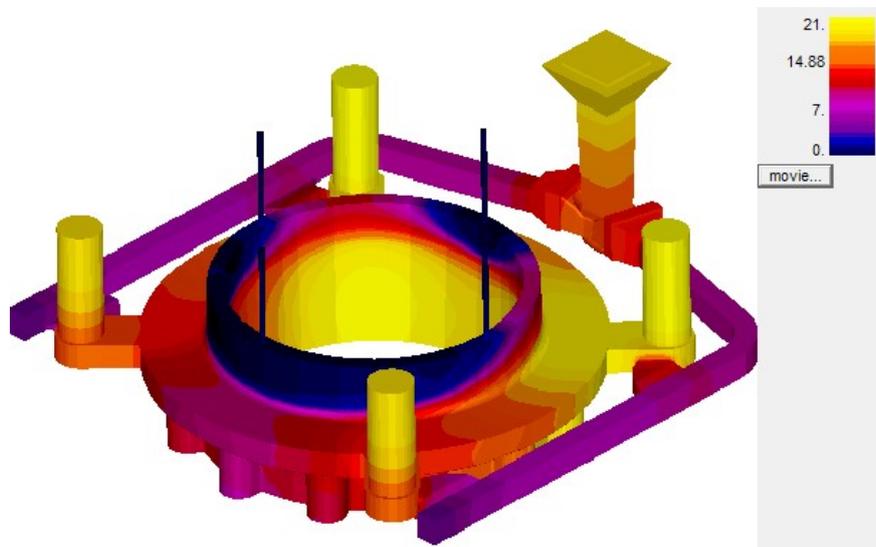


Figura 47 - Resultado do parâmetro do tempo de solidificação da simulação da Proposta 4.

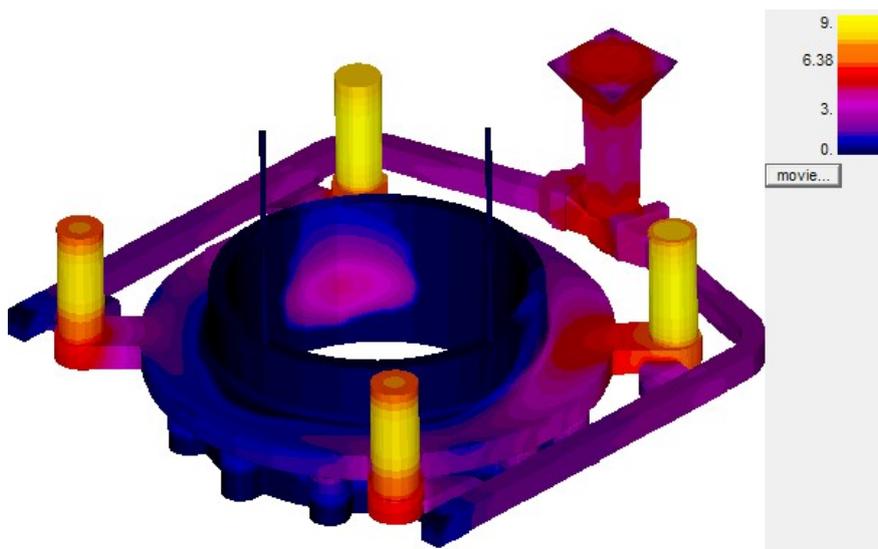


Figura 48 - Resultado do parâmetro do tempo de fração crítica de sólido da simulação da Proposta 4.

Na Figura 47, é possível verificar que a flange solidifica ao fim de aproximadamente 21 minutos. Este tempo é, mais uma vez, semelhante ao modelo atual da empresa. Todavia, e tal com na Proposta 2, os alimentadores arrefeceram ao fim de 21 minutos, tal como a peça.

Ao analisar o parâmetro do tempo de fração crítica de sólido, conforme ilustrado na Figura 48, é possível verificar que a peça não permite trocas de metal ao fim de 3 minutos, com a exceção da zona junto ao alimentador próximo do gito. Já os alimentadores apresentam um tempo entre 7 e 9 minutos, nas extremidades e no seu centro, respetivamente.

De seguida, é apresentado o resultado do gradiente térmico na Figura 49.

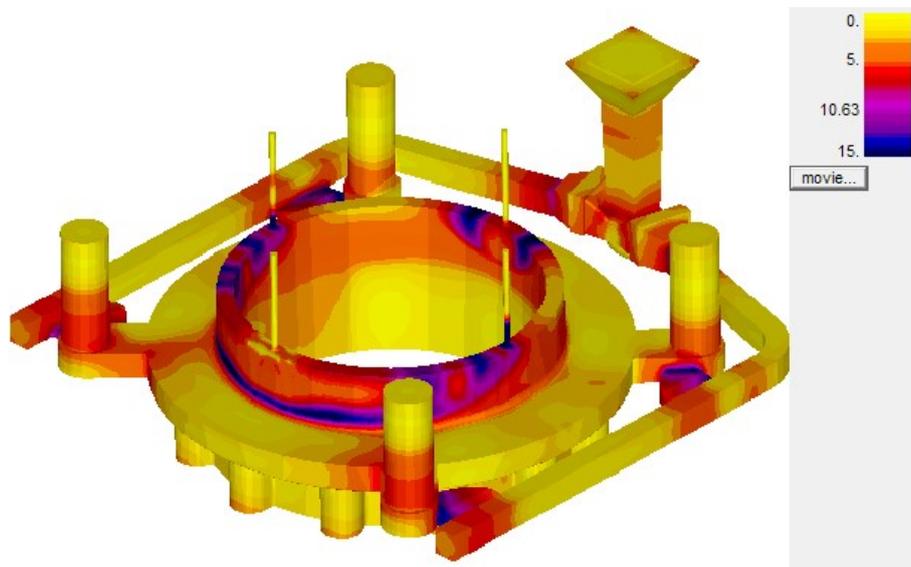


Figura 49 - Resultado do parâmetro do gradiente térmico da simulação da Proposta 4.

Na Figura 49, verifica-se novamente que toda a peça tem uma temperatura bastante homogénea por toda a sua extensão, com a exceção da zona superior.