

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Utilização da Simulação do enchimento e da solidificação no aumento da eficiência do metal vazado na DURITCAST

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Pedro Miguel Andrade Cardoso

Dissertação realizada sob a supervisão do
Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro,
Do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

E do Eng.º Ricardo Ferreira e Eng.º Luís Sierra,
Da empresa DURITCAST.

Porto, Julho de 2009

<i>CANDIDATO</i>	Pedro Miguel Andrade Cardoso	<i>Código</i>	010508022
<i>TÍTULO</i>	Utilização da simulação do enchimento e da solidificação no aumento da eficiência do metal vazado na DURITCAST		
<i>DATA</i>	17 de Setembro de 2009		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C603 - 11:00h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Henrique Manuel Cunha Martins dos Santos	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor António Alberto Caetano Monteiro	DEM/EEUM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro	DEMM/FEUP

Agradecimentos

Desejo agradecer a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação, especialmente ao meu orientador o Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro e a todos os colaboradores da DURITCAST, em especial ao Eng. Ricardo Ferreira e Eng. Luís Sierra, Vicente e ao João Duarte.

Gostaria também de agradecer todos pela força e apoio demonstrados, em especial aos meus pais Carlos e Irene e ao meu irmão Sérgio Cardoso bem como aos meus amigos Daniel Casanova, Pedro Trigo, Cláudia Lopes, Sónia Simões e Natércia Silva.

Resumo

Este trabalho foi efectuado no âmbito da Tese de Mestrado do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em parceria com a DURITCAST.

Esta dissertação transcreve os acompanhamentos na implementação, adaptação dos meios existentes de trabalho, procura de informação sobre configuração e parametrização de um novo software de simulação de enchimento e solidificação em Portugal, o QuikCAST, comercializado pela ESI Group, na empresa DURITCAST S.A., com o objectivo de prever defeitos e problemas de alimentação e gítagem no enchimento e solidificação para reduzir o refugo de certas peças, nomeadamente defeitos de porosidade, bem como o acompanhamento de ensaios para validação dos resultados obtidos na simulação e finalmente a transmissão de toda a informação e método de trabalho do programa aos responsáveis da sua utilização no futuro.

Relativamente às simulações efectuadas, foram usadas três hipóteses de gítagem e três camisas exotérmicas diferentes para se obter peças sem qualquer porosidade. As variáveis da simulação (alimentação, temperaturas) foram definidas a partir das alimentações já existentes, mas outras que foram formuladas em trabalho de equipa, de reuniões que eu mantinha com os responsáveis de Engenharia e Controlo do Processo.

No final obteve-se a validação experimental da hipótese que melhor convinha a DURITCAST S.A., tendo sido os objectivos propostos atingidos.

Abstract

This work was made for the master thesis of 5^o year of the “*Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais*” of “*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*” in partnership with DURITCAST.

This thesis describes the development work of implementing new simulation software of filling and solidification in Portugal, produced by the ESI Group, the QuikCAST in the company DURITCAST, to predict and prevent defects and problems of feeding and gating in the filling and solidification with the purpose to reduce the scrape rate of certain parts which have porosity problems. Relatively the simulations, it had been used some exothermic sleeves and gating alternatives to get a casting free of porosity. The implementation and calibration of the simulation program in the company was made by me, as well the study of the different gating hypothesis.

In the end it was made an experimental validation of the alternative way that better agreed to DURITCAST, having been reached the considered objectives.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Índice de figuras	v
1. Introdução	1
1.1. Apresentação da DURITCAST	1
1.2. Considerações Gerais	2
2. Fundamentos teóricos	4
2.1. Fundamentos de Alimentação e Gitagem	4
2.1.1. Sistema de alimentação	4
2.1.2. Sistema de gitagem	5
2.2. Características das ligas e da areia verde usadas na produção	9
2.3. Software de simulação de Enchimento e Solidificação	11
2.3.1. Método das Diferenças Finitas	11
2.3.2. Software QuikCAST	11
3. Método Experimental	13
3.1. Definição dos parâmetros de pré-processamento da simulação	17
4. Resultados e Discussão das Simulações	18
4.1. Hipótese 1	20
4.2. Hipótese 2	29
4.3. Hipótese 3	36
5. Validação da peça	43
6. Conclusão	46
Referências	48
Anexos	49

Índice de figuras

Figura 1 e 2. Imagem em Solidworks da peça A173 à esquerda e da B174 à direita -----	2
Figura 3. Imagem dos pontos quentes da peça A173 em QuikCAST -----	3
Figura 4. Imagem dos pontos quentes da peça B174 em QuikCAST -----	3
Figura 5. Esquemática de um sistema de alimentação-----	6
Figura 6. Perfil do fluxo metálico: a) em queda livre; b) dentro de um gito de paredes paralelas; c) dentro de um gito cônico-----	8
Figura 7. Turbulência em metais líquidos-----	9
Figura 8. Interface gráfica do QuikCAST -----	12
Figura 9. Menu de criação do modelo de estudo -----	13
Figura 10. Menu de importação dos ficheiros-----	13
Figura 11. Menu “ <i>Model</i> ” e os seus submenus -----	13
Figura 12. Submenu de reparação automática da malha (“ <i>automatic mesh fixing</i> ”)-----	14
Figura 13. Submenu “ <i>Domains Manager</i> ” do menu “ <i>Model</i> ”, onde se cria os volumes e escolhe o material-----	15
Figura 14. Submenu “ <i>3D Grid/Mesh Generation</i> ” do menu “ <i>Model</i> ” -----	15
Figura 15. Menu geral do QuikCAST, em especial o menu “ <i>Process</i> ”-----	16
Figura 16 e 17. Submenu “ <i>input data check</i> ” (à esquerda) e “ <i>solidification material parameters</i> ” (à direita) do menu “ <i>Process</i> ”-----	16
Figura 18. Imagem da versão inicial da peça A173, com alimentadores laterais, e duas camisas exotérmicas centrais-----	18
Figura 19. Imagem versão inicial da peça B174, apenas uma peça por placa de moldação -	18
Figura 20. Resultado da macroporosidade (“ <i>Shrinkage Porosity</i> ”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C - CFSP = 0.6, para CFSP =0.8 o resultado foi muito semelhante a este) -----	20
Figura 21 e 22. Resultado da macroporosidade (“ <i>Shrinkage Porosity</i> ”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) ---	21
Figura 23. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (T=1340°C) -----	21
Figura 24. Resultado da macroporosidade (“ <i>Shrinkage Porosity</i> ”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6) -----	22
Figura 25 e 26. Resultado da macroporosidade (“ <i>Shrinkage Porosity</i> ”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) ---	22
Figura 27. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6) -----	23

Figura 28. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6)	23
Figura 29 e 30. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)	23
Figura 31. Resultado do tempo de solidificação da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C)	24
Figura 32. Resultado da “Shrinkage Porosity” (macroporosidade) da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP= 0.6)	24
Figura 33. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C)	25
Figura 34 e 35. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)	25
Figura 36. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6)	26
Figura 37. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.8)	26
Figura 38 e 39. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)	27
Figura 40. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6)	27
Figura 41 e 42. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)	28
Figura 43. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6)	29
Figura 44. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.8)	29
Figura 45 e 46. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).....	30
Figura 47. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C)	30
Figura 48. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6)	31
Figura 49. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6)	31
Figura 50 e 51. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).....	31

Figura 52. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C) -----	32
Figura 53. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6) -----	32
Figura 54. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6) -----	33
Figura 55 e 56. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6)-----	33
Figura 57. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6) -----	34
Figura 58. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6) -----	34
Figura 59 e 60. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6)-----	35
Figura 61. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C) -----	36
Figura 62. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6) -----	36
Figura 63 e 64. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFSP = 0.6) -----	37
Figura 65. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6) -----	37
Figura 66. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6) -----	38
Figura 67 e 68. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFSP = 0.6) -----	38
Figura 69. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C) -----	39
Figura 70. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.6)-----	39
Figura 71 e 72. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFS = 0.6) -----	40
Figura 73. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.6)-----	40
Figura 74. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.6)-----	40

Figura 75. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.8)-----	41
Figura 76 e 77. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFS = 0.6)-----	41
Figura 78. Peça A173 em da hipótese 1 (que foi produzida) à esquerda e corte da peça com destaque para o nº2 o local onde aparecia rechupe à direita-----	43
Figura 79. Imagem do corte da peça na zona nº 2, onde agora não aparece rechupe-----	43
Figura 80. Imagem em corte da peça B174,sem aparecimento de rechupe-----	44
Figura 81 e 82.Imagem em corte do alimentador de topo (da camisa exotérmica) da peça.	44
Figura 83. Submenu “input data check” do menu “Process”-----	50
Figura 84. Imagem explicativa do que é o volume “inlet” no QuikCAST -----	50
Figura 85. Explicação visual do parâmetro de pré-processamento “Surface Roughness” ----	51
Figura 86. Menus dos parâmetros de pré-processamento, “Permeability”, “Ceramic Foam Filter” e “Surface Roughness”, respectivamente-----	51
Figura 87. Menus dos parâmetros de pré-processamento, “Temperature” e “External Exchange” respectivamente -----	52
Figura 88. Menus dos parâmetros de pré-processamento, “Exothermic Material” e “Contact Resistance” respectivamente -----	52
Figura 89. Submenu “solidification material parameteres” do menu “Process” -----	53
Figura 90. Explicação do CFSP e CFSPipping-----	53
Figura 91. Submenu de escolha de cálculo da simulação-----	54
Figura 92. Imagem com o cálculo da secção de ataque para 2 ataques -----	54
Figura 93. Imagem com o cálculo da secção de ataque para 3 ataques -----	55
Figura 94. Imagem com o cálculo da secção de ataque para 5 ataques -----	55
Figura 95. Simulação do enchimento em 2%-----	56
Figura 96 e 97. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita) -----	56
Figura 98 e 99. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 99% (direita) -----	57
Figura 100. Simulação do enchimento em 5%-----	57
Figura 101 e 102. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita)-----	58
Figura 103 e 104. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita) -----	58
Figura 105. Simulação do enchimento em 5%-----	58
Figura 106 e 107. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita)-----	59
Figura 108 e 109. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita) -----	59
Figura 110. Simulação do enchimento em 5%-----	60
Figura 111 e 112. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita)-----	60
Figura 113 e 114. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita) -----	61

Figura 115. Simulação do enchimento em 5%-----	61
Figura 116 e 117. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita)-----	62
Figura 118 e 119. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita) -----	62
Figura 120. Simulação do enchimento em 5%-----	62
Figura 121 e 122. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita)-----	63
Figura 123 e 124. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita) -----	63
Figura125. Simulação do enchimento em 20% peça A173-----	64
Figura 126 e 127. Simulação do enchimento em 50% peça A173 (esquerda) e B174 (direita)	64
Figura 128 e 129. Simulação do enchimento em 20% (esquerda) e 60% (direita) peça A173, a escala é a mesma da hipótese 1 -----	65
Figura 130. Simulação do enchimento em 65% da peça B174 -----	65
Figura 131. Simulação do enchimento em 25% peça B174 -----	66
Figura 132 e 133. Simulação do enchimento em 60% peça B174 (direita) e A173 (esquerda)	66

1. Introdução

Actualmente a engenharia recorre cada vez mais a softwares CAE (*Computer Assisted Engineering*) com o intuito de resolver problemas, usando a simulação. Para que as empresas de fundição garantam a qualidade das peças produzidas e competitividade, necessitam de adquirir um bom software de simulação do enchimento e solidificação de ligas metálicas. No mercado estão disponíveis diversos softwares, como o MAGMASOFT®, SOLIDCast/FLOWCast®, Flow-3D, QuikCAST entre outros, havendo diferenças entre eles, a nível de preços e método de cálculo da simulação.

Os sistemas de alimentação e gitagem podem ser bastante complexos, sendo necessária a validação experimental, tornando-se assim os softwares de simulação numa preciosa ajuda, pois permitem de forma rápida prever os problemas, diminuindo os custos associados a refugo e ensaios realizados às peças. Se a peça apresentar problemas (como porosidades, etc.) efectua-se uma análise, e se a anomalia for resultado do sistema de alimentação e gitagem, projecta-se um novo sistema que é posteriormente simulado.

1.1. Apresentação da DURITCAST

A DURITCAST é uma empresa pertencente ao Grupo DURIT (criado em 1981), que resulta da aquisição da FUSAG em 2008 e da posterior agregação da Metafalb em 2009.

É uma empresa que direcciona a maior parte da sua produção para a exportação, nomeadamente para os mercados da Alemanha, França e Espanha.

Para melhorar a sua produção e melhorar a sua rentabilidade a DURITCAST investiu recentemente num software de simulação de enchimento e solidificação, para prever os defeitos das peças. O software adquirido foi o QuikCAST, comercializado pela ESI Group. A empresa adquiriu o software com vários objectivos, entre os quais: aumentar a eficiência do metal vazado, diminuir a taxa de refugo, tornar mais rápido e eficaz o desenvolvimento dos sistemas de alimentação e gitagem, diminuir os custos com camisas exotérmicas, etc.

A empresa utiliza um forno de indução com 2 cadinhos de cerca de 4 toneladas cada, e utiliza um programa de análise térmica, o Phaselab.

A DURITCAST tem um sistema de gestão da qualidade certificado pela “*Bureau Veritas Certification*” segundo a norma NP EN ISO 9001:2008.

1.2. Considerações Gerais

Para validar a utilização desta ferramenta de simulação na empresa, foi solicitado uma actualização da produção de um fundido, ou seja, melhoria na peça **A173** e produção da **B174** em que as alterações seriam no tipo de liga e na geometria da peça. A escolha destas peças foi efectuada em virtude de serem as peças mais problemáticas da empresa (devido a sua massividade, ao vazamento de peças muito pesadas em moldação de areia verde e importância do cliente), e as primeiras que a DURITCAST pretendia resolver usando já o novo software QuikCAST.

A produção da peça **A173** apresentava alguns rechupes, sendo necessário melhorar o controlo desta. A **B174** a ser futuramente produzida em duas peças por moldação (actualmente em produção apenas uma peça por moldação).

Foi então proposto desenvolver uma gitagem para as duas peças (gitagem com 2 ataques por peça, recalculando a gitagem e os ataques e verificando que melhor camisa exotérmica a utilizar) para se produzir imediatamente, ficando em estudo novas opções de gitagem para testes e opções futuras (em especial na peça **B174**), com objectivo de diminuir o refugo e melhorar a eficiência do material vazado.

O fundido consiste num travão industrial (utilizado nas turbinas eólicas), com um peso aproximado de 95kg e volume 12900 cm³ (**A173**), 90kg e volume 12000 cm³ (**B174**) sendo produzidos em moldações de areia verde com dimensões 1100x950x500 mm contendo 2 peças.

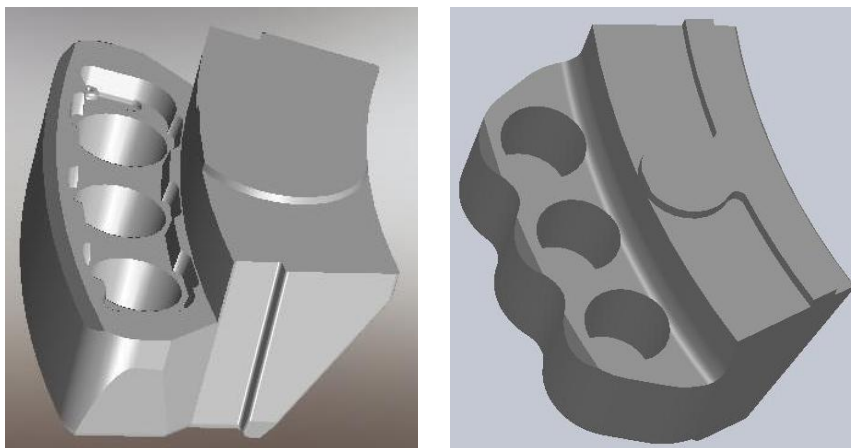


Figura 1 e 2. Imagem em Solidworks da peça **A173** à esquerda e da **B174** à direita.

A principal diferença, (para além da geometria da peça), está na liga usada, EN-GJS-500-7 (DIN GGG50), na **A173** e a EN-GJS-400-18-LT (DIN GGG40.3) na **B174**.

As figuras 3 e 4 mostram os pontos quentes (locais críticos para aparecimento de rechupe na peça) das duas peças em estudo, simulados no programa QuikCAST. Como se pode verificar a zona crítica encontra-se no centro da peça, sendo nessa zona que existe uma maior probabilidade de aparecer rechupe.

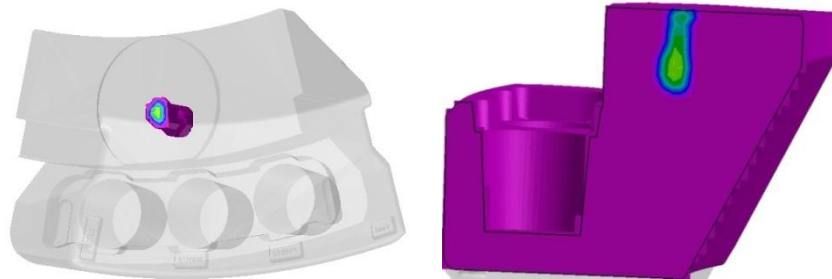


Figura 3. Imagem dos pontos quentes da peça A173 em QuikCAST.

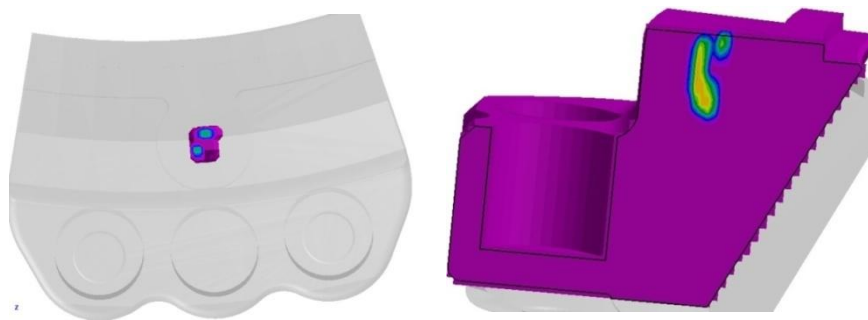


Figura 4. Imagem dos pontos quentes da peça B174 em QuikCAST.

Na tabela I apresenta-se resultados de refugo de diversos anos relativos a peça A173, relativamente à peça B174, como é relativamente nova e foi pouco produzida (apenas com uma peça por moldação) não existem dados do refugo dos anos anteriores.

Tabela I. Refugo da peça A173 nos anos de 2006 a 2008.

Refugo	2006	2007	2008
	18,7%	14%	10%
Peças produzidas anualmente (aproximadamente)	12000	8000	10000

2. Fundamentos teóricos

2.1. Fundamentos de Alimentação e Gitagem

2.1.1. Sistema de alimentação

Os alimentadores tornam-se necessários para suprir as necessidades de metal resultante da contracção do banho no estado líquido. Assim, pode-se evitar o aparecimento de rechupes resultantes da solidificação e contracção da liga.

Para que o sistema de alimentação cumpra o seu objectivo, as dimensões, a geometria e o número de alimentadores tem que seguir alguns critérios (o do módulo, o do volume e da distância de alimentação) [1].

- ***Critério do módulo e do volume***

O critério do módulo consiste em criar condições para uma solidificação direccionada. A análise de solidificação do conjunto (alimentador e fundido) deve confirmar a existência de um caminho de solidificação, ou seja, um aumento progressivo do valor do módulo de arrefecimento desde a secção mais distante a alimentar até ao interior do alimentador [1].

O módulo do alimentador deve ser superior ao da parte da peça ao qual está ligado, ou seja:

$$M_a = \xi \times M_{pp} \quad (1)$$

Em que o valor de ξ é um coeficiente que depende do tipo e posicionamento do alimentador e do tipo da liga:

$$\xi = \text{Factor de posição} \times \text{Factor do tipo da liga} \quad (2)$$

Na maioria dos casos, é suficientemente seguro atribuir ao alimentador um módulo 20% (para aços) a 30% (para ligas não ferrosas e ferro fundido nodular) superior ao módulo do ponto quente [1].

A utilização de uma camisa exotérmica aumenta artificialmente o módulo de arrefecimento do alimentador, podendo o seu diâmetro ser reduzido relativamente ao de um alimentador sem camisa. Uma camisa tem os seus custos mas permite economias em termos de metal.

O critério do volume pode ser expresso pela equação:

$$V_{alimentador} = V_{peça} \times \frac{\beta}{\mu - \beta} \quad (3)$$

Onde:

β - Contração específica da liga;

μ - Rendimento do alimentador;

$V_{peça}$ - Volume da peça a alimentar.

Ao estabelecer a comparação entre os dois critérios, deverá seleccionar-se, por precaução, aquele que conduz a um alimentador de maior diâmetro de solidificação.

- ***Critério da distância de alimentação***

O alimentador tem um raio de acção limitado; por este motivo deve ser colocado o mais próximo possível do ponto quente. Quando tal não é possível, é útil ter um critério que defina a distância máxima, ou seja a distância de alimentação é aquela que ao fim do qual, o alimentador deixa de ter qualquer efeito.

O modo mais simples de aplicar o critério da distância é desenhar um círculo centrado no alimentador com um raio igual a distância de alimentação mais o raio do alimentador. Assim, a secção do fundido dentro do círculo é alimentada.

2.1.2. Sistema de gitagem

O sistema de gitagem é constituído por um conjunto de canais, de geometria e dimensões apropriadas, que permitem transportar o metal em condições adequadas, (de temperatura, agitação, velocidade e direcção) de modo a permitir encher toda a cavidade de moldação. O sistema de gitagem tem grande importância na medida em que deverá promover um enchimento suave e não turbulento de modo a reter a escória na bacia de vazamento, evitando assim que o metal reaja em demasia com moldação. Também deve garantir uma distribuição do metal a todas as partes da cavidade de moldação e garantir que haja uma distribuição de temperaturas adequada no arrefecimento e solidificação do metal [2,3].



Figura 5. Esquemática de um sistema de alimentação [3].

A figura 5 esquematiza um sistema de alimentação típico, constituído por bacia de vazamento, gito de descida, poço, canal de distribuição e ataques. As dimensões e geometria dos canais são muito importantes para garantir o controlo do fluxo de metal [3].

Existem alguns pontos que deverão ser considerados na elaboração de um sistema de gitagem como:

- Tempo e velocidade de enchimento da moldação;
- Secção de canais e ataques;
- Maximização do rendimento metálico;
- Separação da peça dos canais de gitagem;

A elaboração de um sistema de gitagem deverá ter em conta certos fundamentos relativos à dinâmica de fluidos, como os teoremas de Bernoulli e Torricelli e a lei da continuidade.

O **teorema de Bernoulli** pode ser explicado na medida em que a velocidade é alta onde a pressão é baixa e vice-versa.

Este teorema define que em qualquer ponto de um sistema fechado (um sistema de gitagem é um sistema fechado quando a quantidade de metal que entra no sistema, pela bacia de vazamento, é igual à quantidade de metal que sai pelos ataques), a soma da energia potencial, cinética, pressão e fricção de um fluido é igual a uma constante [3]:

$$E = \frac{1}{2g}V^2 + h + \frac{\rho}{\gamma} = constante \quad (4)$$

Onde existem três componentes da energia a considerar:

$v^2/2g$ = Energia cinética, sendo v a velocidade expressa em m/s e g a aceleração da gravidade em m/s^2 ;

h , em m, definido pela altura do, acima do plano de referência arbitrário, mas que para efeitos de cálculo é mantido constante durante a análise do sistema. O plano de referência é, na prática, o plano de apartação.

ρ/γ = Energia associada à pressão =, sendo ρ a pressão específica (por unidade de área) expressa em kg/m^2 e γ a densidade do metal expresso em kg/m^3 .

O **teorema de Torricelli** enuncia que num sistema fechado, a velocidade de escoamento do fluxo na base da bacia de vazamento, sem considerar perdas por atrito será [3]:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Onde:

v - Velocidade do fluido na base do canal;

g - Aceleração da gravidade;

h - Altura do canal.

A **lei da continuidade** estipula que para um sistema fechado de um líquido incompressível e que possua paredes impermeáveis, o caudal de um banho metálico será o mesmo em todos os pontos que o constitui [3]:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (6)$$

Onde:

Q - Caudal (m^3/s);

A - Área de secção recta ocupada pelo fluido (m^2);

v - Velocidade do fluido (m/s)

Na prática esta lei pode ser verificada interpretando a figura 6, onde a velocidade do fluido aumenta na queda, o que significa que a área da secção recta diminui. Este é o motivo pelo qual o gito de descida é, por norma, cónico [3].

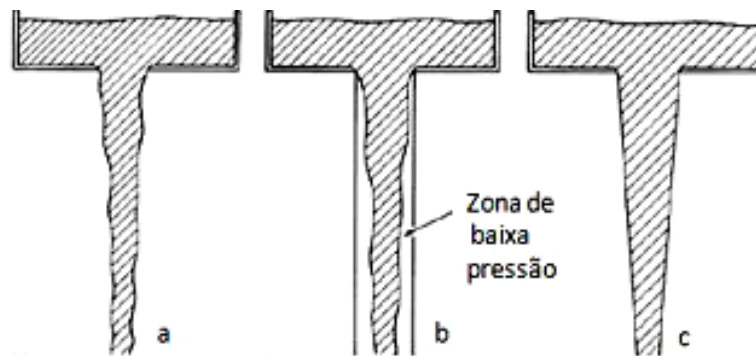


Figura 6. Perfil do fluxo metálico: a) em queda livre; b) dentro de um gito de paredes paralelas; c) dentro de um gito cônico [3].

No caso do gito de paredes paralelas é criada uma zona de baixa pressão. Já no caso do gito cônico este acompanhará o fluxo que se mantém sempre em contacto com as paredes do gito, minimizando desta maneira a aspiração de ar da moldação e a turbulência da superfície [3].

- **Velocidade crítica de vazamento**

Esta velocidade tem como objectivo principal de permitir que a frente do metal avance somente à distância cuja tensão possa preservar a integridade da superfície. Para metais e ligas densas, a bibliografia recomenda que essa velocidade seja inferior 40cm/s [4].

A gota de metal líquido encontra-se em equilíbrio desde que se mova a uma velocidade máxima próxima da velocidade crítica [4].

Se a altura de uma perturbação presente na superfície do banho é resultante do facto da velocidade de enchimento ultrapassar a velocidade crítica, o líquido deixa de ser suportado pela tensão superficial.

Devido à acção da gravidade, essa perturbação da superfície irá colapsar e penetra no interior do metal líquido. A formação dessa perturbação está representada na figura 7 [4].

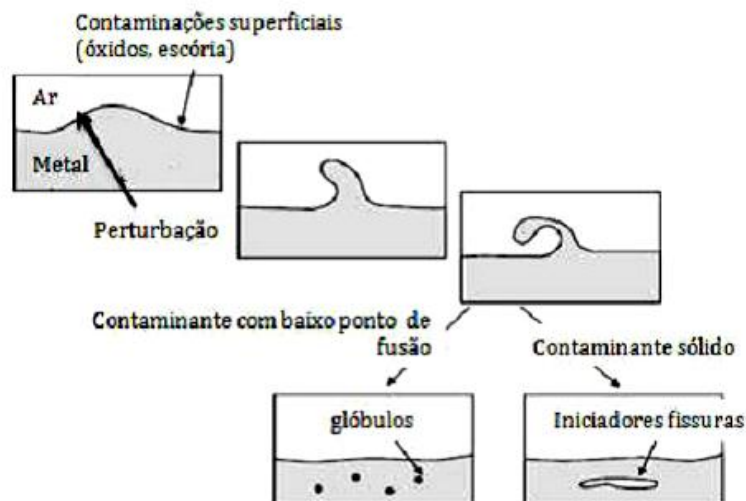


Figura 7. Turbulência em metais líquidos [4].

2.2. Características das ligas e da areia verde usadas na produção

A liga EN-GJS-400-18-LT (DIN GGG40.3) apresenta como grande diferença na composição relativa à liga EN-GJS-500-7 (DIN GGG50) a adição de Níquel (0,20-0,35%) e a não adição de Cobre.

A microestrutura da liga EN-GJS-400-18-LT é ferrítica e contém um máximo de 7% de perlite. A liga EN-GJS-500-7 possui uma microestrutura ferrítica (60% aproximadamente) e perlítica (40% aproximadamente) [5].

As peças feitas na liga DIN GGG40.3 têm a particularidade de aguentar temperaturas de trabalho mais baixas (até 30°C negativos) [5].

As tabelas II, III e IV apresentam a composição química (sendo passível de pequenas afinações derivadas da prática industrial, sendo que esta tabela e da empresa), propriedades mecânicas e temperaturas de *Liquidus* e *Solidus* referentes as duas ligas metálicas usadas nas produções das peças.

Tabela II. Composição das ligas tabeladas na DURITCAST DIN GGG40.3 e DIN GGG50.

Liga	Composição (% média)							
	C	Si	Mn	S	Mg	P	Ni	Cu
EN-GJS-400-18-LT	3,65	2,10	0,35	0,025	0,045	0,06	0,27	-
EN-GJS-500-7	3,65	2,40	0,35	0,025	0,045	0,06	0,15	0,25

Tabela III. Propriedades mecânicas das ligas DIN GGG 40.3 e DIN GGG 50 [5].

Material	Resistência à tracção Min. (MPa)	Limite elástico 0.2% (MPa)	Alongamento (%)	HB	
				Min	Max
EN-GJS-400-18-LT	400	240	18	130	180
EN-GJS-500-7	500	320	7	170	190

Tabela IV. Características das ligas DIN GGG 40.3 e DIN GGG 50 [5].

Material	Temperatura de Liquidus (°C)	Temperatura de Solidus (°C)	Densidade (kg/m ³)
EN-GJS-400-18-LT	1160	1089	7050
EN-GJS-500-7	1148	1080	7000

A tabela V refere-se as características da areia verde da moldação que é utilizada na DURITCAST e portanto na produção das peças A173 e B174.

Tabela V. Características da areia verde usada na DURITCAST.

Areia Verde	H ₂ O (%)	Bentonite Activa	Compactabilidade (%)	RCompressão (g\cm ²)	Permeabilidade
Min - Max	3,3 - 3,8	7 - 9,5	30 - 40	1500-2400	130-170

2.3. Software de simulação de Enchimento e Solidificação

2.3.1. Método das Diferenças Finitas

A simulação pelo método das diferenças finitas (FDM) tem como base uma malha composta por cubos unitários, todos eles com as mesmas dimensões [6].

A simulação consiste na interacção sucessiva da transferência de propriedades entre cubos vizinhos. Um exemplo de software que usa este modelo é o QuikCAST. As diferenças finitas têm as seguintes vantagens:

- Geração automática da malha
- Obtenção rápida de resultados
- Software de fácil utilização

E as seguintes desvantagens:

- Não é possível otimizar a malha
- Menor precisão de cálculo
- Não é possível simular fenómenos direccionais

2.3.2. Software QuikCAST

Na compra do QuikCAST e/ou do ProCAST comercializado pela ESI GROUP, são incluídos dois programas adicionais:

- **GEOMESH:** Importador de ficheiros CAD (stl, igs, step), é uma ferramenta pré-processadora para o MeshCAST, programa adicional fornecido pela ESI Group.
- **VisualCAST:** O pós-processador de visualização dos resultados [7].

O QuikCAST é um software de diferenças finitas (utiliza a combinação das equações Navier-Stokes com a entalpia), mais básico e mais económico do que o ProCAST. O custo de uma licença ronda 40 mil euros. As simulações neste programa são rápidas, demorando em média 10 horas a simulação de enchimento e solidificação e 2 a 3 horas apenas a simulação da solidificação (dependendo do número de nós escolhidos para a malha e do “step” de cálculo, estes tempos são para casos com nº de nós a rondar os 5 milhões, o nº de nós a utilizar deverá ser entre os 3-6 milhões para melhores resultados). A versão utilizada foi a 2009.

Este software é fácil de utilizar, tendo como vantagens o malhamento e reparação da malha que são criadas de modo automático, sendo as simulações rápidas e realistas (sendo os parâmetros de pós-processamento mais requisitados a porosidade, tempo de solidificação, pontos quentes, velocidades do fluido na cavidade, este programa permite

também simular fundição injectada) possuindo uma base de dados muito vasta (podendo ser adicionados novos dados aos existentes). A figura 8 mostra a interface gráfica do QuikCAST [7].

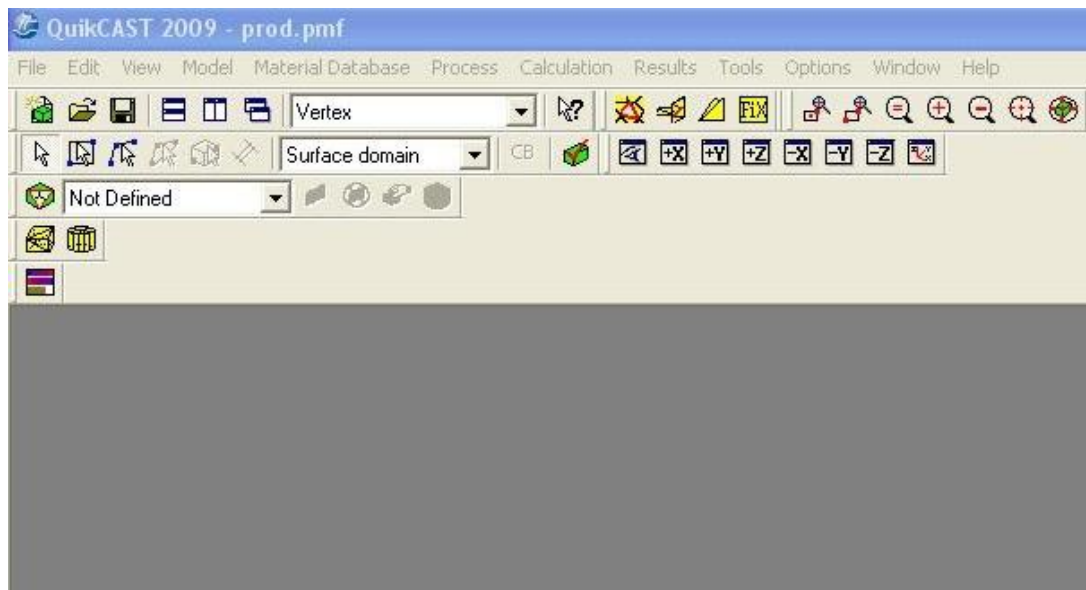


Figura 8. Interface gráfica do QuikCAST [7].

O software ProCAST é um software mais completo, utilizando o método de elementos finitos, exigindo maiores requisitos computacionais. Uma mais-valia deste programa é a simulação das microestruturas (dendrites, dureza HB, etc) e termo-mecânicas. O custo de uma licença ronda 120 mil euros, o que em comparação com o QuikCAST se torna muito dispendioso [7].

3. Método Experimental

Neste capítulo vão ser abordados os dados de pré-processamento usados no QuikCAST, uma explicação de utilização mais detalhada do programa encontra-se em anexo (alguns textos são em inglês, nomeadamente os menus do programa para melhor compreensão de quem for utilizar o QuikCAST).

Inicialmente cria-se um novo modelo de estudo (escolhendo o nome e a localização), como mostra a figura 9, e importa-se os ficheiros em formato stl, (que é o mais recomendado, podendo ser importados outros formatos, tais como pmf, sm), dos diferentes componentes (giteagem, fundido, alimentadores, camisas, etc), como na figura 10) [8].

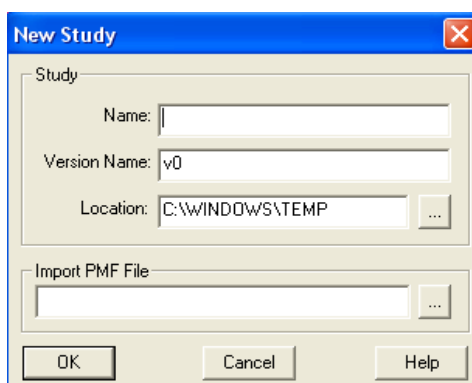


Figura 9. Menu de criação do modelo de estudo [8].

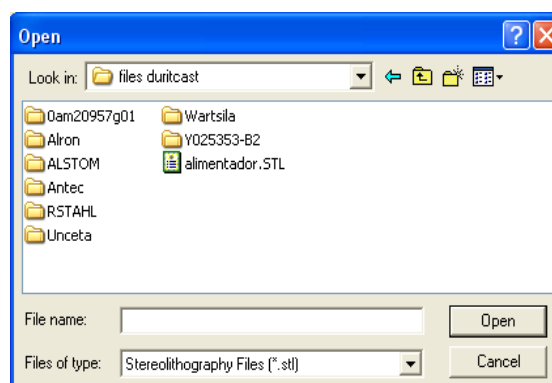


Figura 10. Menu de importação dos ficheiros [8].

Passando ao menu “*Model*” terá várias opções, como serão explicadas algumas delas de seguida.

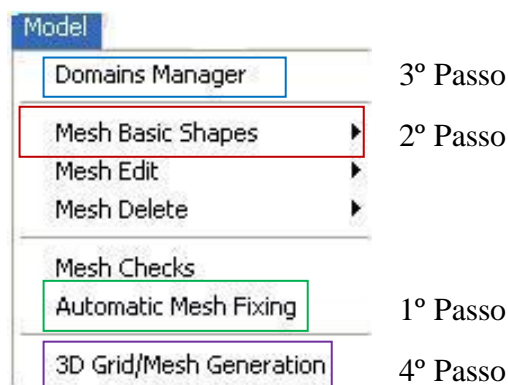


Figura 11. Menu “*Model*” e os seus submenus [8].

No submenu "automatic mesh fixing" do menu "Model" (1º Passo) procede-se ao arranjo da malha (dos ficheiros importados).

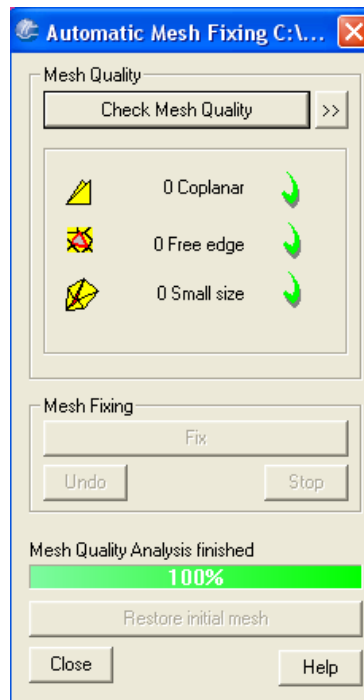


Figura 12. Submenu de reparação automática da malha ("automatic mesh fixing") [8].

No QuikCAST é possível criar volumes específicos como a moldação e o "inlet" (local de entrada do material fundido) no submenu "mesh basic shapes" (2º Passo). O passo seguinte será gerar os volumes específicos (gitagem, fundido, camisas, etc) e escolher o tipo de material, liga e moldação (camisas exotérmicas, areias,) em "Domains Manager" (3º Passo).

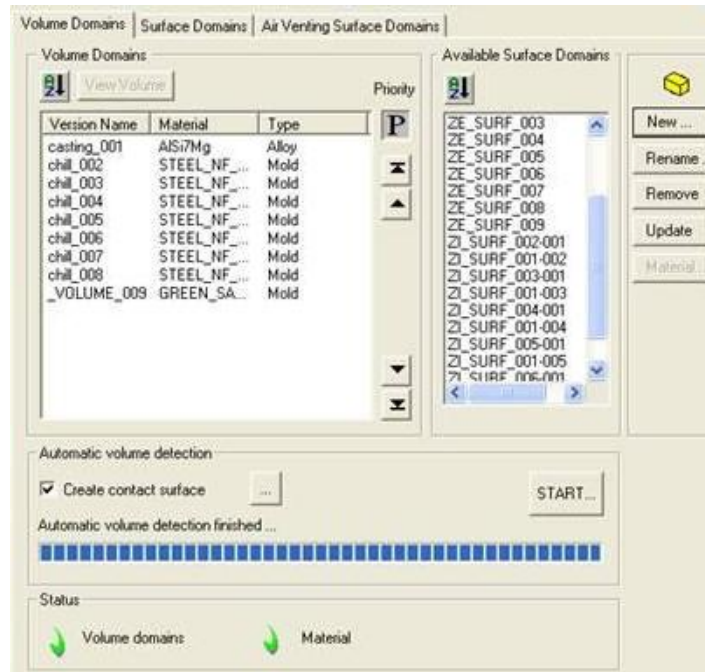


Figura 13. Submenu “Domains Manager” do menu “Model”, onde se cria os volumes e escolhe o material [8].

Posteriormente cria-se a grelha e a malha dos volumes no submenu “3D Grid/Mesh Generation” (4º Passo), onde se escolhe o número de células (ou nós) em função do tamanho da malha (não devendo exceder 6 milhões, devido a ao uso de memória para o processo, dando erro de malha) [7].

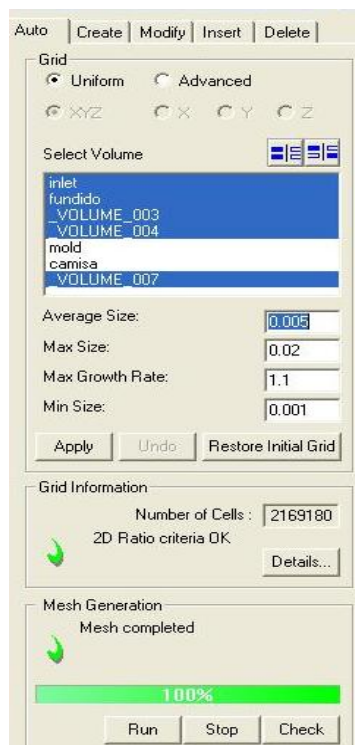


Figura 14. Submenu “3D Grid/Mesh Generation” do menu “Model”.

No menu “Process”, refere-se a gravidade, os dados hidráulicos e térmicos para a simulação e os parâmetros de solidificação do material [8].

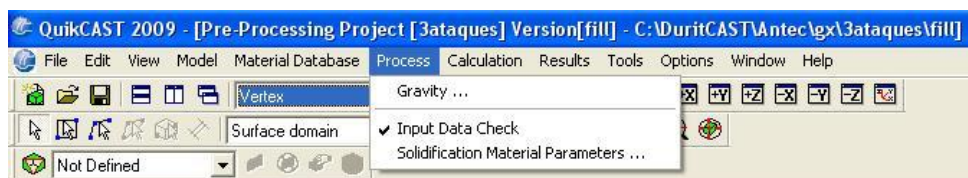


Figura 15. Menu geral do QuikCAST, em especial o menu “Process” [8].

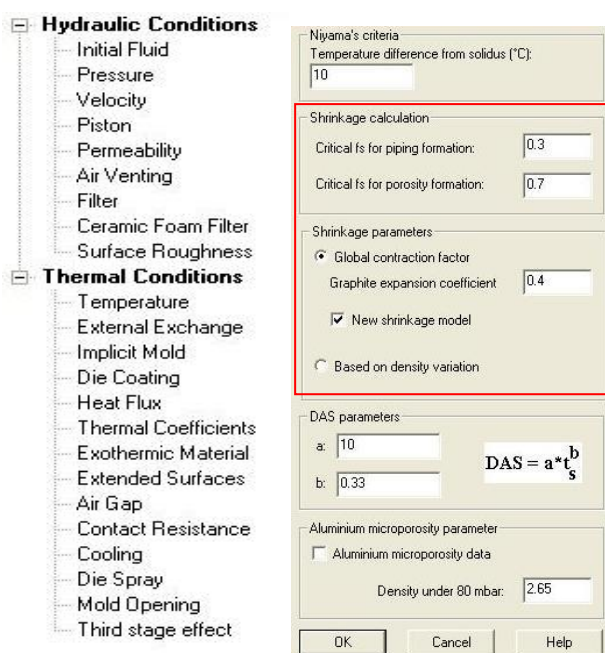


Figura 16 e 17. Submenu “input data check” (à esquerda) e “solidification material parameters” (à direita) do menu “Process” [8].

Estes dois submenus são importantes na simulação, com destaque para o submenu “Solidification material parameters”, que nos permite escolher os parâmetros para a detecção da porosidade (ver figura 17). [8]

O parâmetros de pós-processamento são visualizados no VisualCAST, sendo de salientar: pontos quentes, enchimento da cavidade (em função da temperatura e velocidade), porosidade (“Shrinkage Porosity”), tempo de solidificação, fracção sólida (simulado no enchimento) e líquida (simulada na solidificação).

3.1. Definição dos parâmetros de pré-processamento da simulação

- Menu “Input data check”

Os dados introduzidos neste menu são os necessários para a simulação, podendo ser divididos em dois submenus: condições hidráulicas e térmicas (figura 16).

Tabela V. Dados introduzidos no menu “Input data check”.

Condições Hidráulicas	Condições Térmicas
Fluido inicial - inlet	Temperatura (1340°C)
Velocidade - em função do tempo de vazamento de 30s	Trocas Externas - Valor de 0,9 de emissividade para moldação/exterior Valor de 0,3 fundido/moldação
Permeabilidade - 130 (areia verde)	Material Exotérmico (tabela de camisas)
Filtro cerâmico (ppi = 10 e espessura = 22mm)	Resistência de contacto

- Menu “Solidification material parameters”

Neste parâmetro existem duas opções (figura 17), o “*shrinkage calculation*” (com o “*Critical fraction solid pipping*” (define o limite da fracção sólida para a formação do “pipping”) e “*Critical fraction solid porosity*” (nos resultados usaremos a designação CFSP, que define o limite da fracção sólida para formação da macro/micro porosidade, ou seja abaixo do valor introduzido só calculará microporosidade)) e o “*shrinkage parameters*” (com “*global contraction factor*” e “*based on density variation*”, sendo este último o usado nas simulações, onde utiliza a variação da curva de densidade da liga escolhida para obter resultados de contracção que influenciam a porosidade) [7].

Finalmente procede-se ao início da simulação (em “*start calculation*” com opções de simulação de apenas enchimento, apenas solidificação ou enchimento e solidificação).

Em anexo explica-se alguns termos em mais pormenor, como por exemplo estes dois menus anteriores.

Tabela VI. Características do computador utilizado nas simulações na DURITCAST.

Computador DURITCAST	QuikCAST 2009
Processador	Quadcore X5450 3GHz
Memória	8GB

4. Resultados e Discussão das Simulações

Uma vez que o principal defeito encontrado nesta peça era macro e microrechupe, sendo o parâmetro de pós-processamento recomendado para analisar este tipo de defeito o “*shrinkage porosity*” no *VisualCAST* (referentes as simulações em *QuikCAST*). O resultado tempo de solidificação foi apenas incluído para verificação das zonas que demoram mais tempo a solidificar, outras simulações extra como o enchimento encontra-se em anexo.

Como já foi referido no ponto 1.2, a peça A173 já era produzida com duas peças por moldação (com duas camisa exotérmicas localizadas no topo/centro de cada peça e alimentadores laterais, ver figura 18), neste caso procedeu-se a alterações na gitagem, primeiro recalculando a de 2 ataques por peça e posteriormente passando calculando uma gitagem com 3 ataques e 5 ataques por peça, e apenas usando uma camisa exotérmica na zona central/topo da peça.

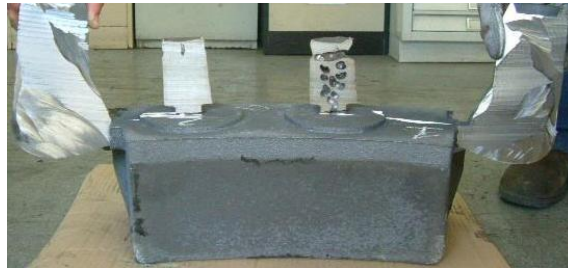


Figura 18. Imagem da versão inicial da peça A173, com alimentadores laterais, e duas camisas exotérmicas centrais.

Na peça B174, apenas estava a ser produzido uma peça por moldação (com uma camisa exotérmica (igual a nº1) localizada no topo/centro de cada peça), sendo necessário calcular as gitagens para alimentação de duas peças por moldação, de igual modo que na anterior começando por 2 ataques, depois 3 e finalmente 5 ataques por peça.



Figura 19. Imagem da versão inicial da peça B174, apenas uma peça por placa de moldação.

Os parâmetros gerais usados nas simulações encontram-se detalhados na tabela VII.

Tabela VII. Parâmetros gerais usados nas simulações.

Parâmetro	A173	B174
Temperatura vazamento	1340°C	
Tempo de enchimento	30s	
Liga de vazamento	GGG 50	GGG 40.3
Material da Moldação	Areia verde	
Filtro	Cerâmico 10PPI	

Na tabela VIII encontram-se descritas as diversas hipóteses de alterações para as duas peças, tendo estas sido projectadas para aumentar o número de ataques a encher cada cavidade (os cálculos das gitagens encontram-se em anexo), com o intuito de a peça encher de um modo mais uniforme e menos turbulento, visando também a diminuição de porosidade.

Tabela VIII. Hipóteses estudadas de alterações feitas nas peças.

Hipótese nº	Para as peças A173 e B174
<u>1</u>	Gitagem com 2 ataques por peça
	Opção A - Camisa exotérmica 1
	Opção B - Camisa exotérmica 2
	Opção C - Camisa exotérmica 3
<u>2</u>	Gitagem com 3 ataques por peça
	Opção A - Camisa exotérmica 1
	Opção C - Camisa exotérmica 3
<u>3</u>	Gitagem com 5 ataques por peça
	Opção B - Camisa exotérmica 2
	Opção C - Camisa exotérmica 3

Em cada hipótese iremos alterar certos parâmetros de pré-processamento na simulação, para uma maior comparação:

- ✓ Variação da gama de temperatura de vazamento ($\pm 30^\circ\text{C}$):
1310°C - 1340°C - 1370°C
- ✓ Variação do “Critical Fraction Solid Porosity” no “shrinkage calculation”
CFSP = 0.6 e CFSP = 0.8 (apenas para a temperatura de 1340°C):

Na tabela IX estão apresentadas as propriedades das camisas exotérmicas utilizadas nas simulações. As camisas exotérmicas 2 e 3 são camisas com a mesma geometria e marca, sendo mais caras que a camisa exotérmica 1.

Tabela IX. Propriedades das camisas exotérmicas 1, 2 e 3 utilizadas na simulação.

Propriedade	Camisa 1	Camisa 2	Camisa 3
Volume	1900cm ³	1350cm ³	1500cm ³
Modulo	3,2	3,2	4,2
Tempo de Queima	2minutos	3minutos	3minutos
Dimensões	125/210mm	120/150mm	140/150mm

4.1. Hipótese 1

Nesta hipótese recalculou-se a gitagem da peça A173 e usou-se o mesmo tipo de gitagem para a peça B174. Nesta foram testadas 3 opções de camisas exotérmicas. O peso da gitagem é de 28kg.

✓ Simulação da peça A173

- Opção A - Camisa exotérmica 1

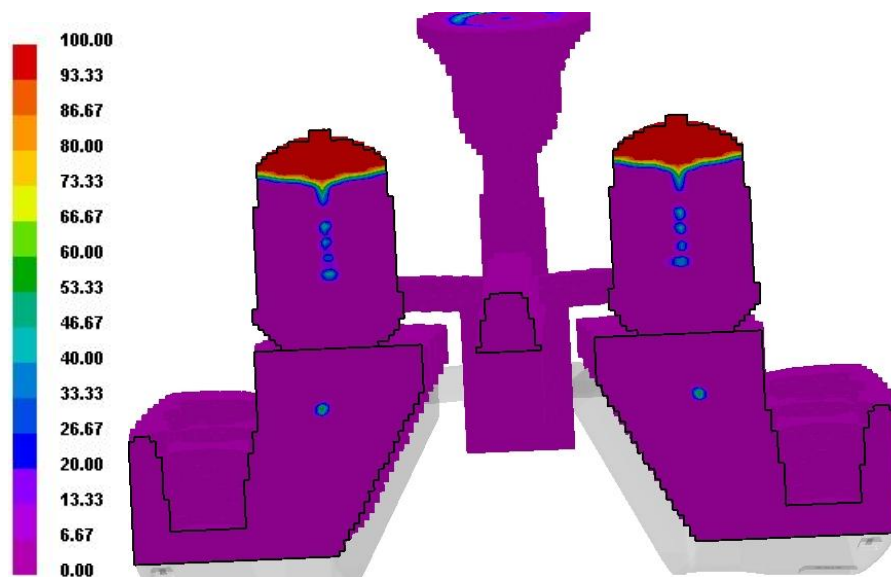


Figura 20. Resultado da macroporosidade (“Shrinkage Porosity”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C - CFSP = 0.6, para CFSP =0.8 o resultado foi muito semelhante a este).

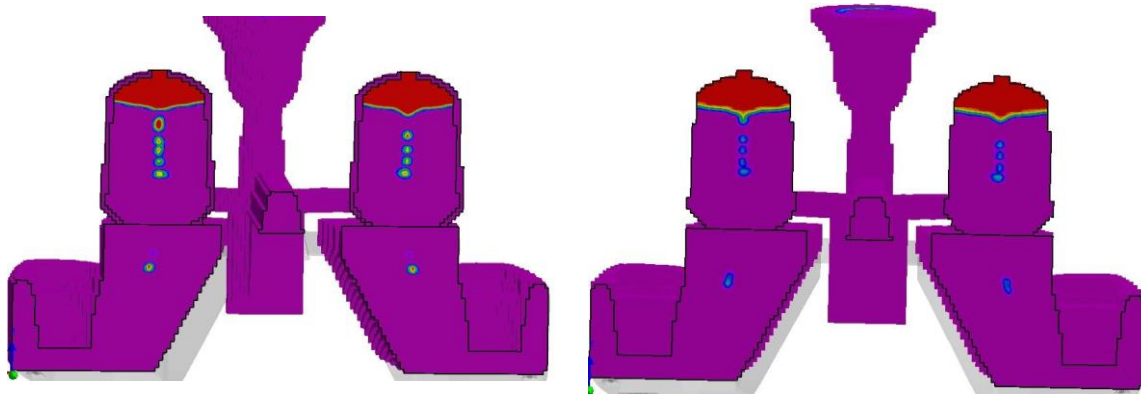


Figura 21 e 22. Resultado da macroporosidade (“Shrinkage Porosity”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)).

Relativamente aos resultados obtidos na simulação para esta opção de camisa exotérmica, prevê-se o aparecimento de porosidade na zona central da peça, como se pode verificar nas figuras 20, 21 e 22 (mesmo a uma temperatura de 1370°C aparece porosidade na peça).

○ Opção B - Camisa exotérmica 2

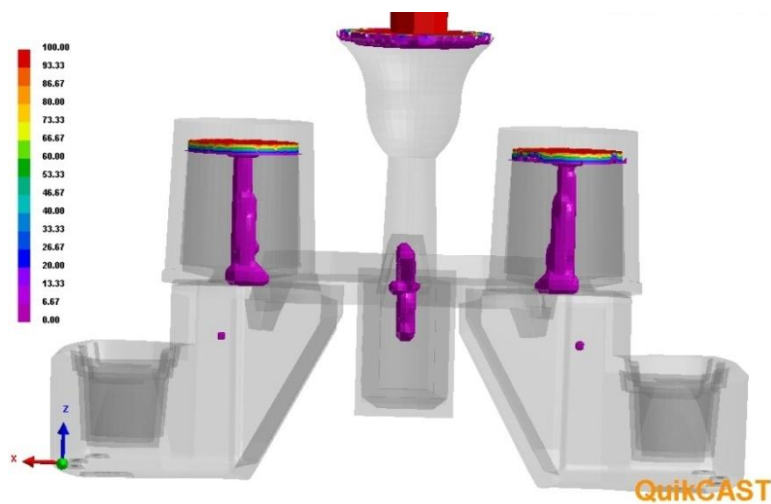


Figura 23. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (T=1340°C).

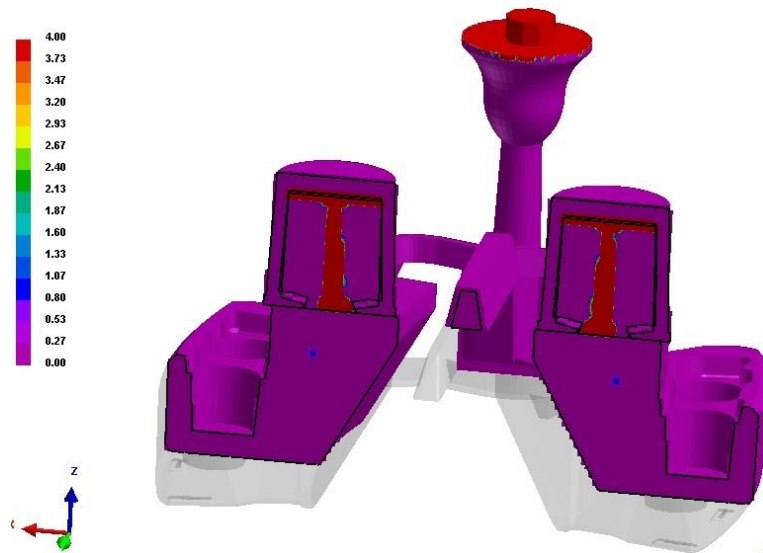


Figura 24. Resultado da macroporosidade (“*Shrinkage Porosity*”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6).

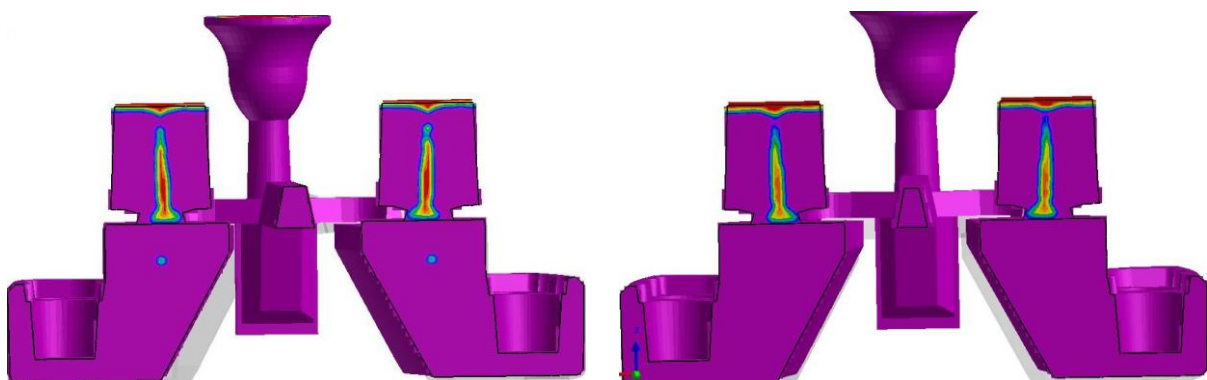


Figura 25 e 26. Resultado da macroporosidade (“*Shrinkage Porosity*”) da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)).

Na peça A173 as simulações prevêem porosidade apenas na opção B (sendo uma porosidade mais reduzida do que a da opção A), nas figuras 23 a 25, não prevendo porosidade nas peças com uma temperatura de vazamento de 1370°C (figura 26).

○ Opção C - Camisa exotérmica 3

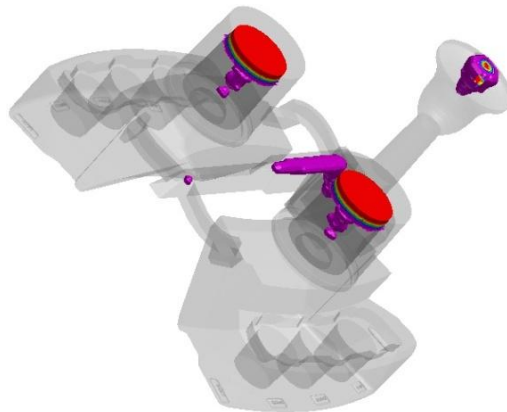


Figura 27. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6).

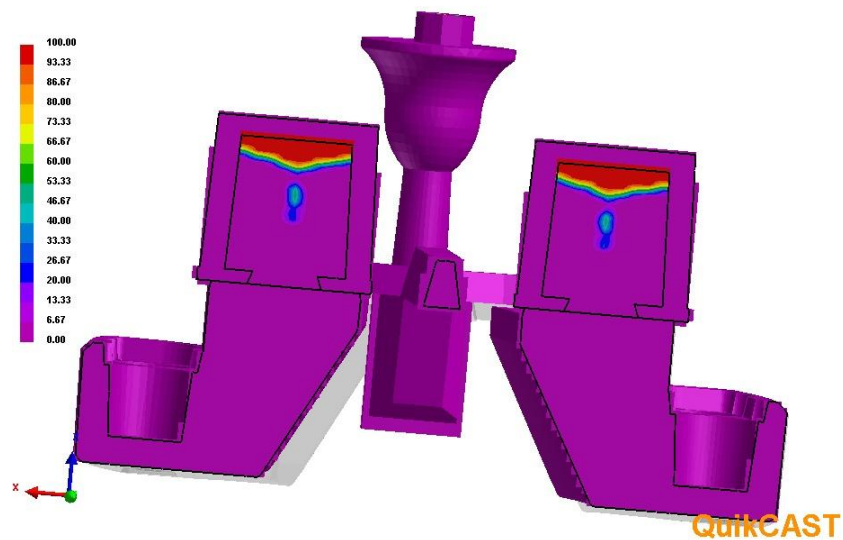


Figura 28. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6).

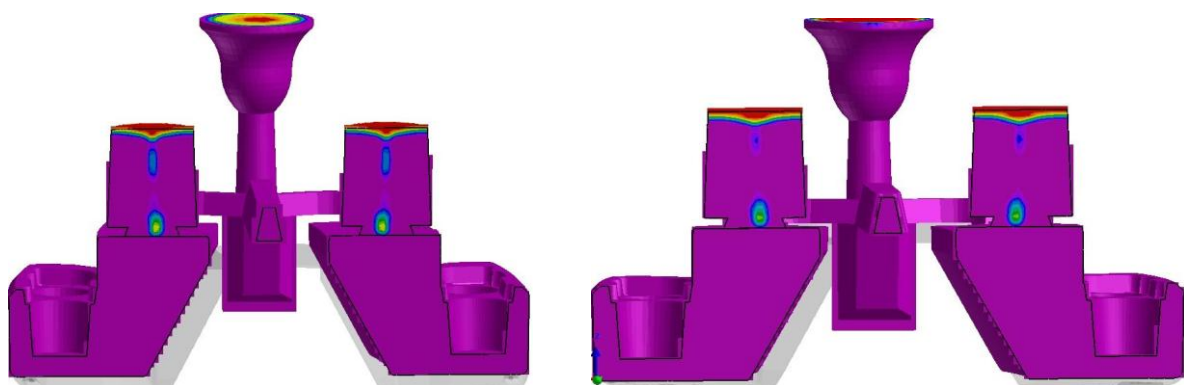


Figura 29 e 30. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)).

Nesta peça as simulações da opção C não prevêm aparecimento de porosidade nas peças em nenhuma das condições simuladas, como se observa atentamente pelas figuras 27 a 30.

✓ Simulação da peça B174

○ Opção A - Camisa exotérmica 1

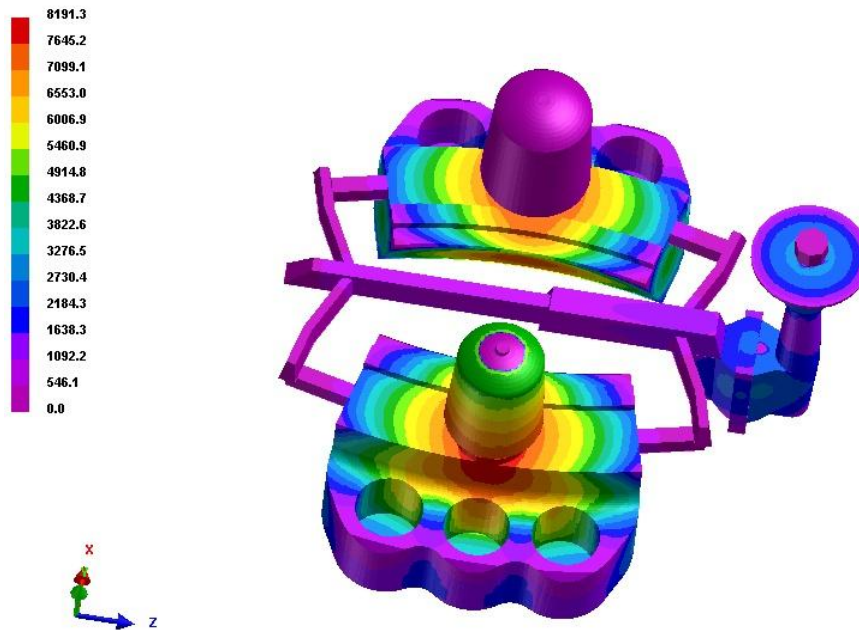


Figura 31. Resultado do tempo de solidificação da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C).

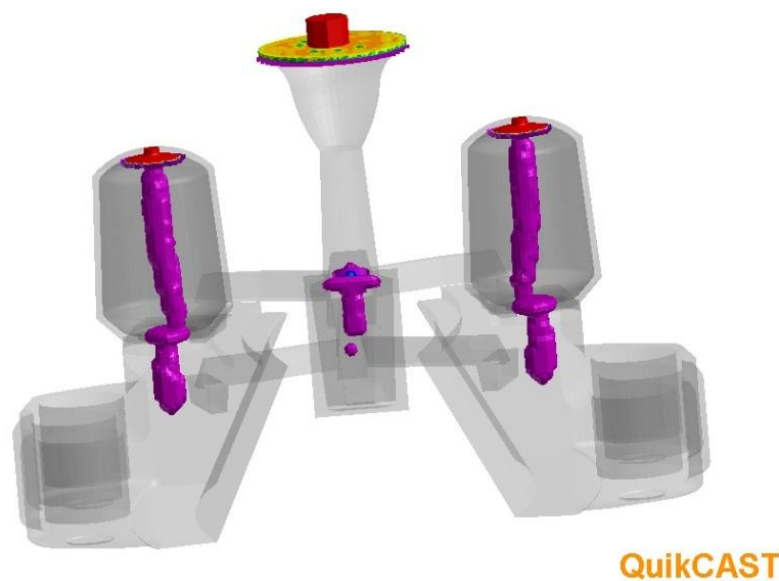


Figura 32. Resultado da “Shrinkage Porosity” (macroporosidade) da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP= 0.6).

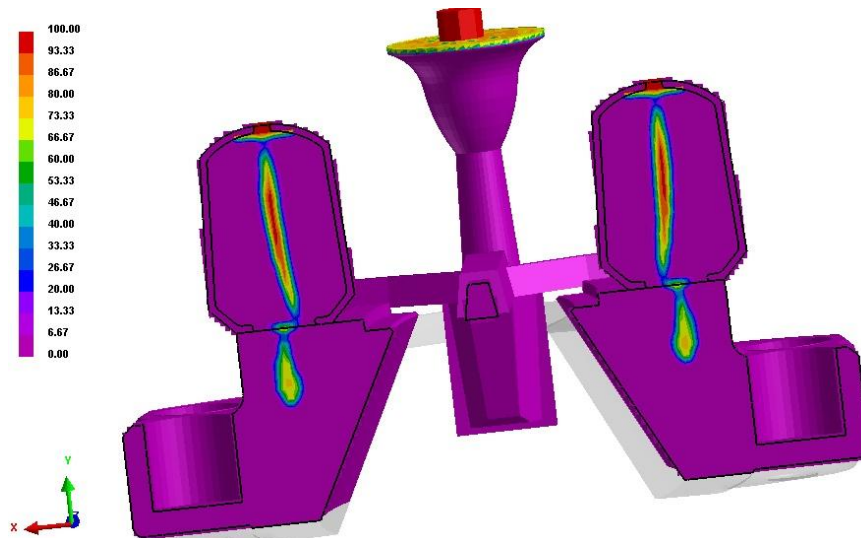


Figura 33. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C).

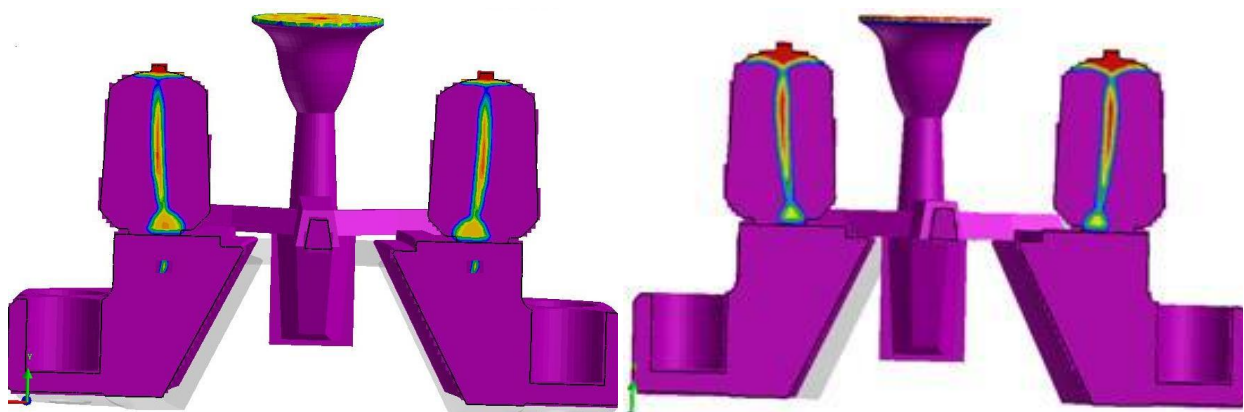


Figura 34 e 35. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)).

Os resultados das simulações para esta opção prevêm o aparecimento de porosidade nas peças da simulação de temperaturas de 1340°C e 1310°C, como vemos nas figuras 32, 33 e 34 sendo que a 1370°C já seria possível obter peças sem porosidade, (ver figura 35). Podemos também ver que o tempo de solidificação da peça é mais longo na zona central (figura 31, zona vermelha da peça), aonde tenderá a aparecer porosidade.

○ Opção B - Camisa exotérmica 2

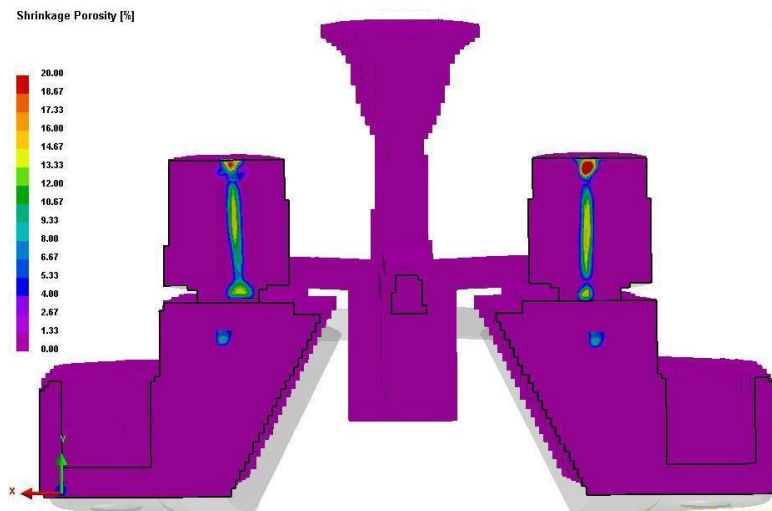


Figura 36. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6).

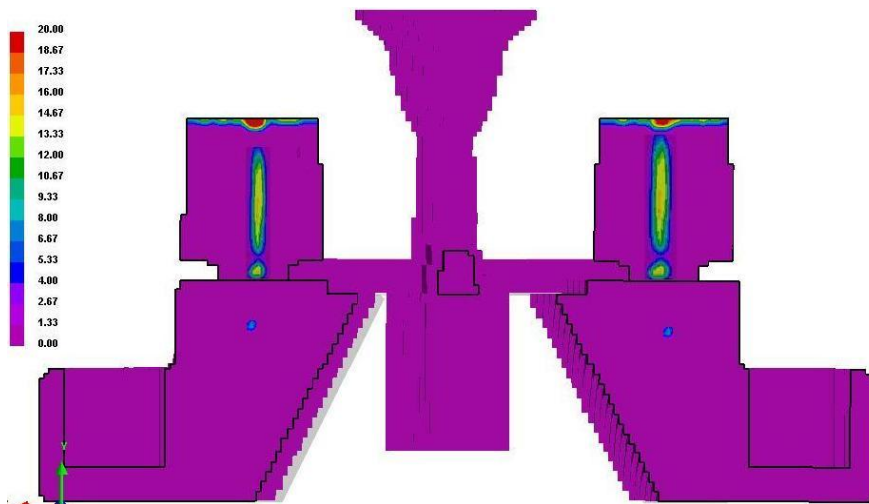


Figura 37. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.8).

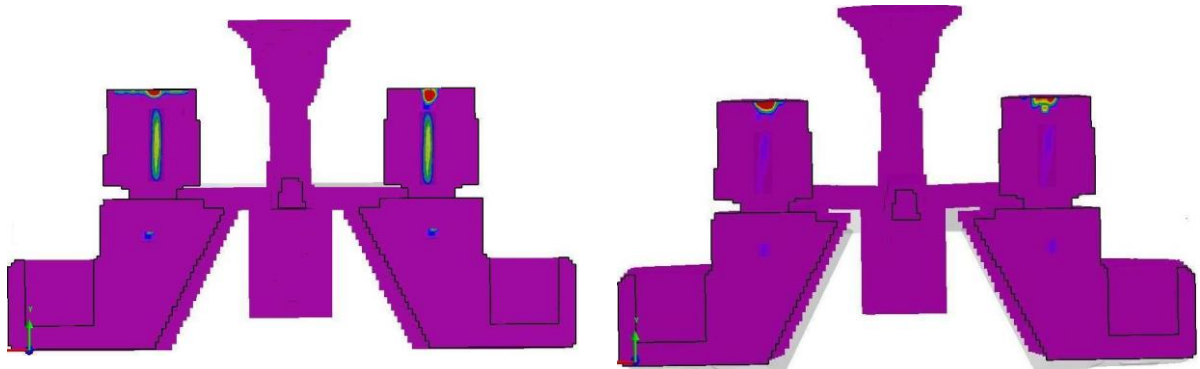


Figura 38 e 39. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)).

Nesta opção de camisa exotérmica para a peça B173, as simulações prevêem porosidade em todas as tentativas simuladas, ou seja nas diversas temperaturas (1310°C, 1340°C e 1370°C), como indicam as figuras 36 a 39, sendo que à temperatura de 1370°C indica uma possibilidade de macroporosidade reduzida.

- Opção C - Camisa exotérmica 3

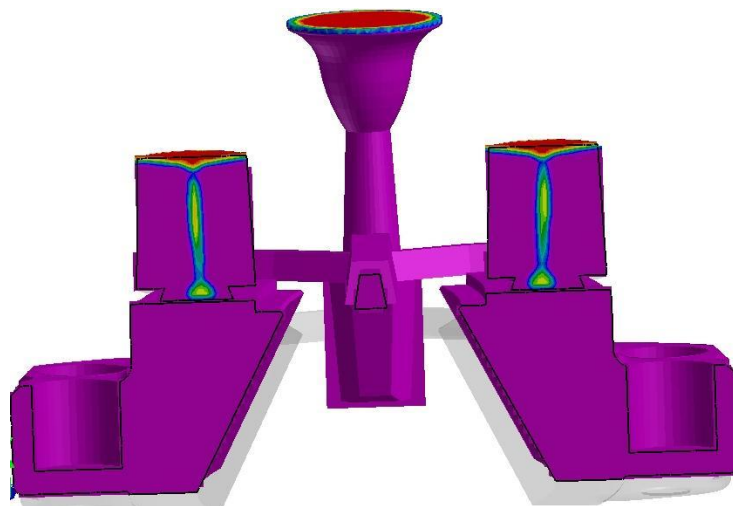


Figura 40. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C, CFSP=0.6).

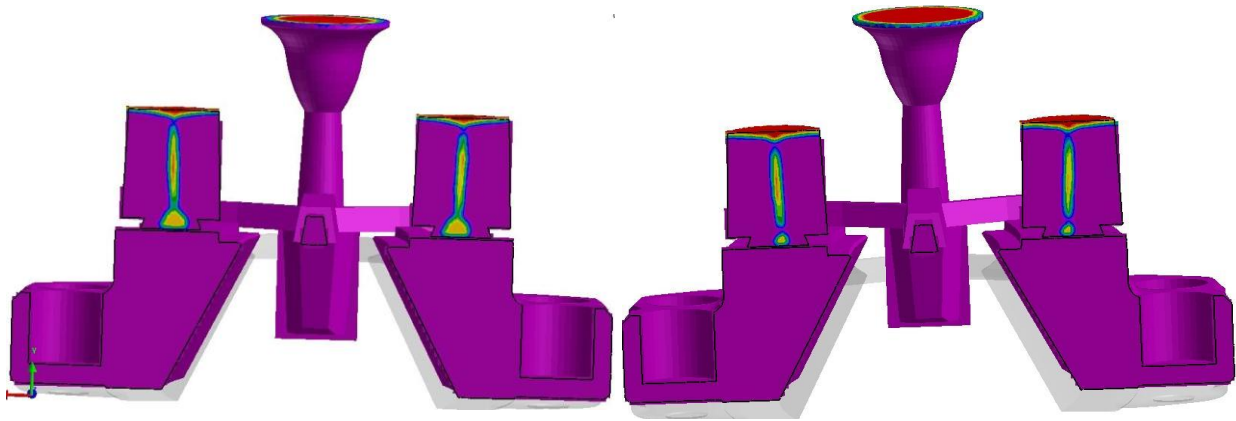


Figura 41 e 42. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita)).

Nesta peça as simulações da opção C não prevêm aparecimento de porosidade (macro ou micro) nas peças em nenhuma das condições simuladas, como se observa atentamente pelas figuras 40 a 43.

4.2. Hipótese 2

Nesta hipótese usou-se uma gitagem com 3 ataques por peça. Foram utilizadas seguintes camisas exotérmicas utilizadas no estudo (1 e 3). O peso da gitagem é de 29kg.

- Simulação da peça A173
 - Opção A - Camisa exotérmica 1

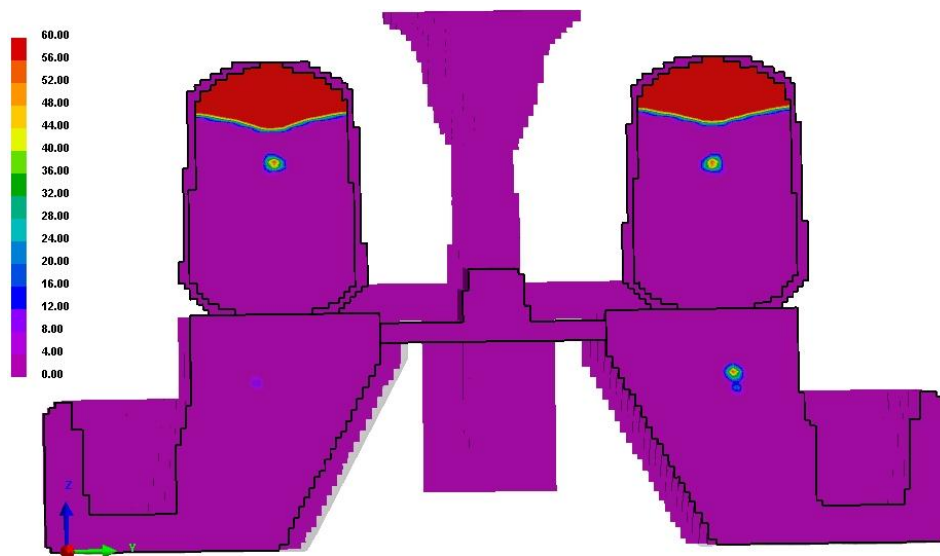


Figura 43. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

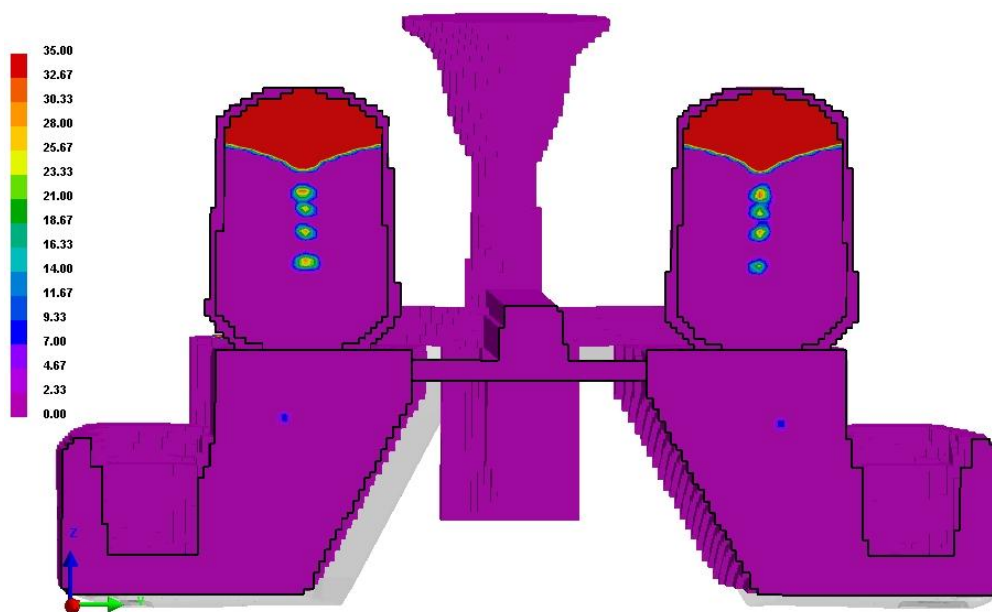


Figura 44. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.8).

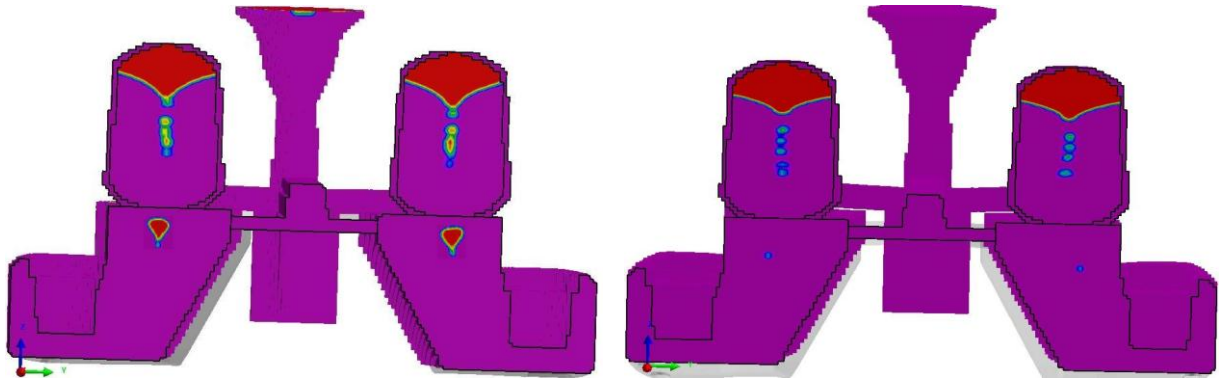


Figura 45 e 46. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).

Observando as figuras 43 e 44, verificamos que para esta opção prevê-se a possibilidade de porosidade a temperatura usual de vazamento destas peças (1340°C), mesmo com um valor de CFSP maior (0.8). Nas simulações a temperaturas diferentes, é de salientar o aparecimento de uma enorme porosidade (macroporosidade) na temperatura de 1310°C (ver figura 45), e bastante menor na de 1370°C (ver figura 46).

○ Opção C - Camisa exotérmica 3

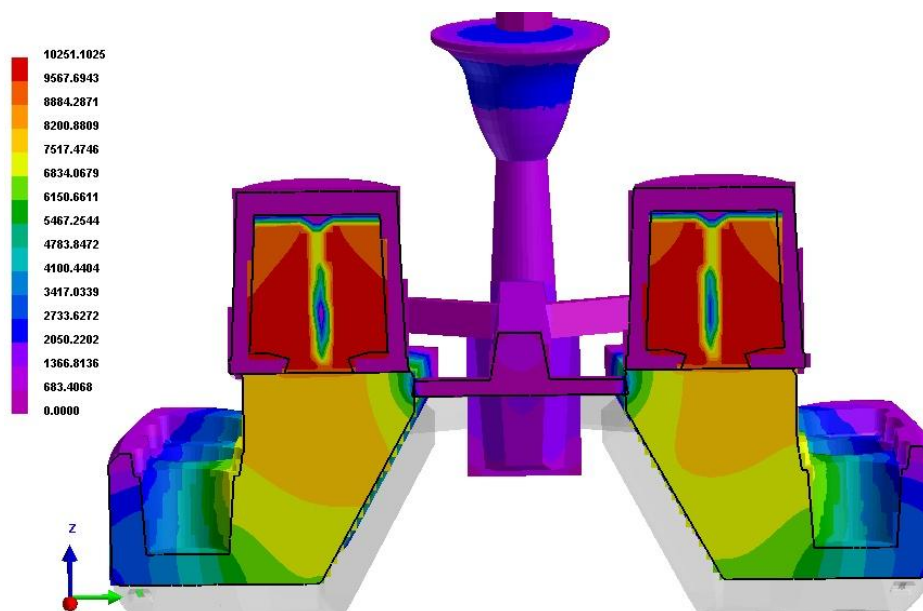


Figura 47. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C).

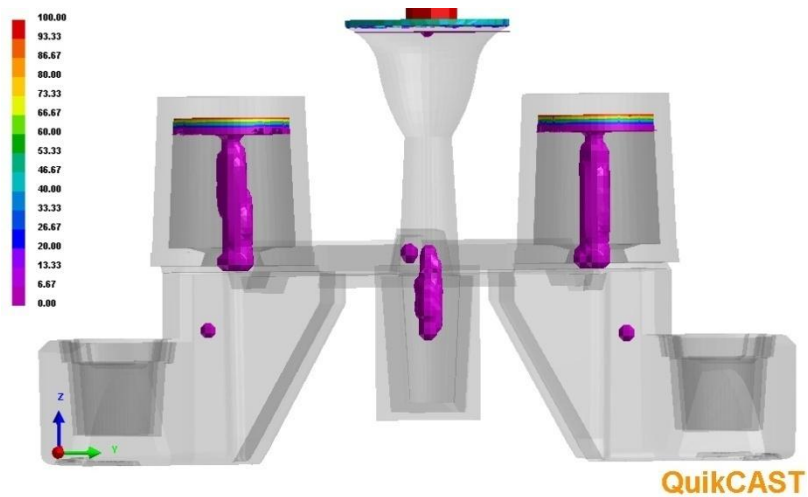


Figura 48. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

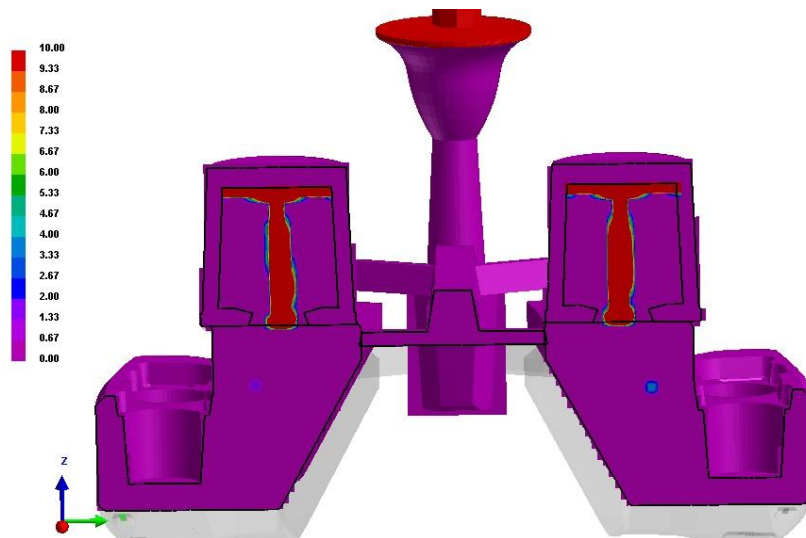


Figura 49. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

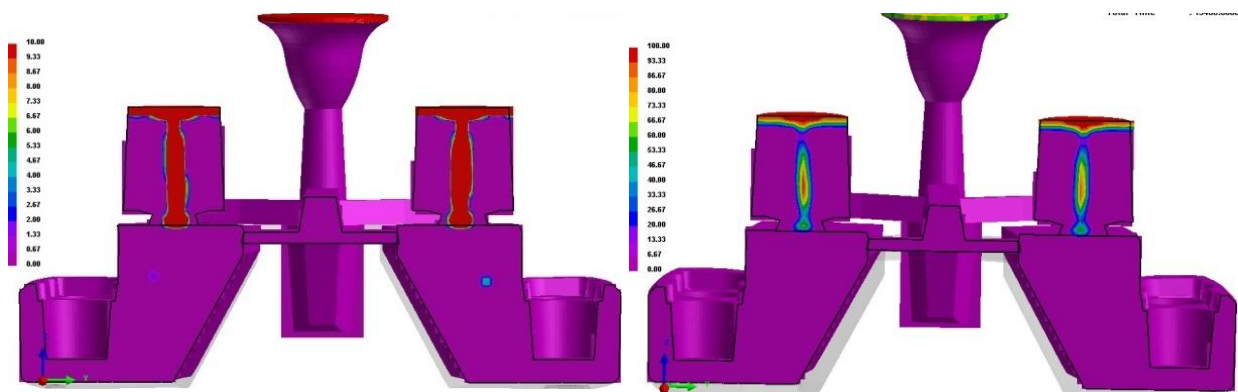


Figura 50 e 51. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).

Para esta hipótese, relativa a esta opção C, as simulações efectuadas prevêem aparecimento de porosidade (menor do que na opção A) nas peças para as temperaturas de 1310°C e 1340°C (ver figuras 48 a 50), apenas a simulação a temperatura superior (1370°C), sairia sem nenhum problema (figura 51).

- Simulação da peça B174
 - Opção A - Camisa exotérmica 1

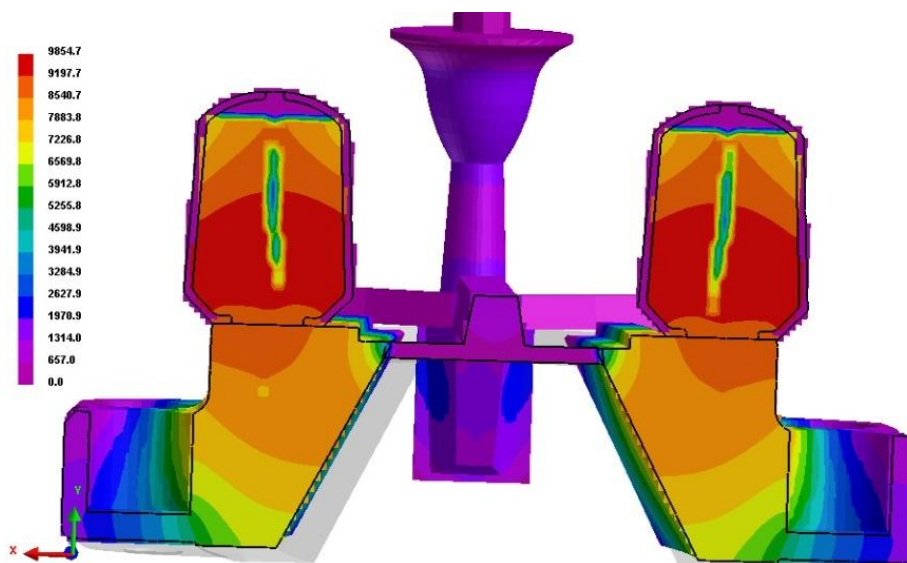


Figura 52. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C).

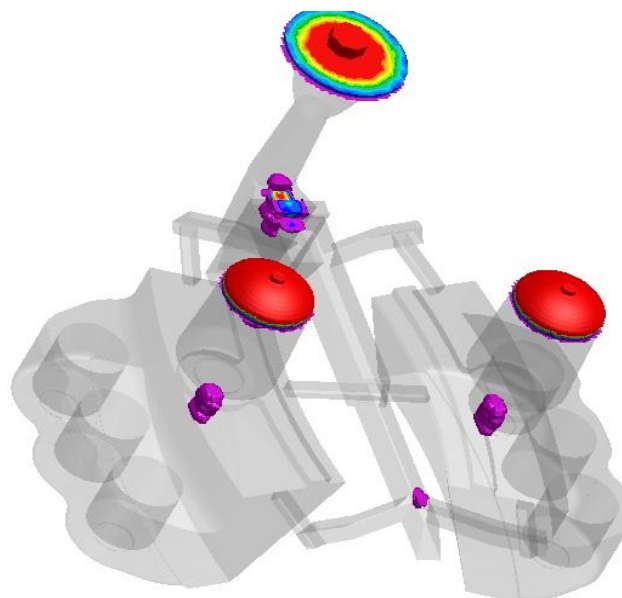


Figura 53. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

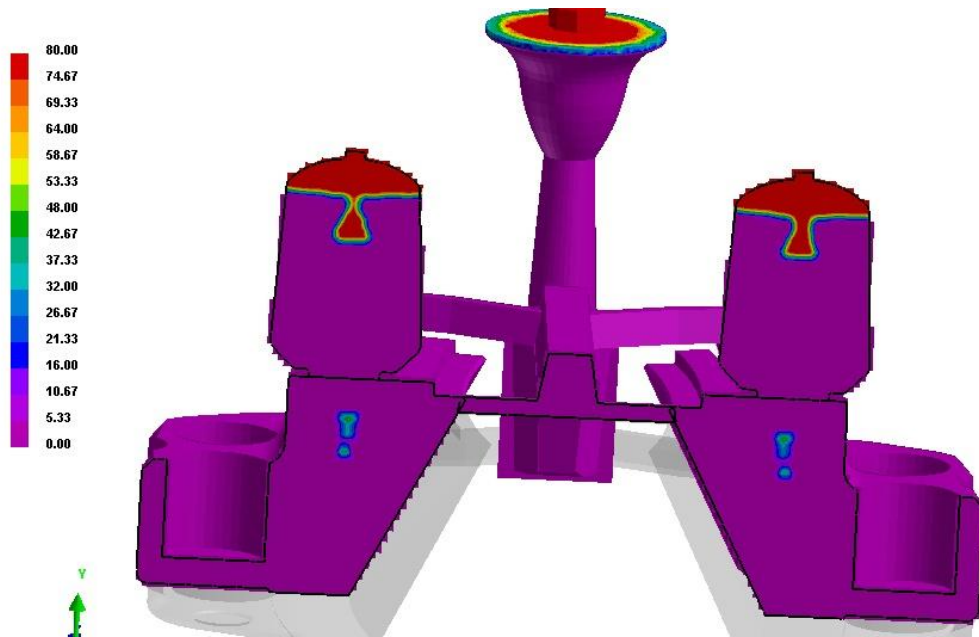


Figura 54. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

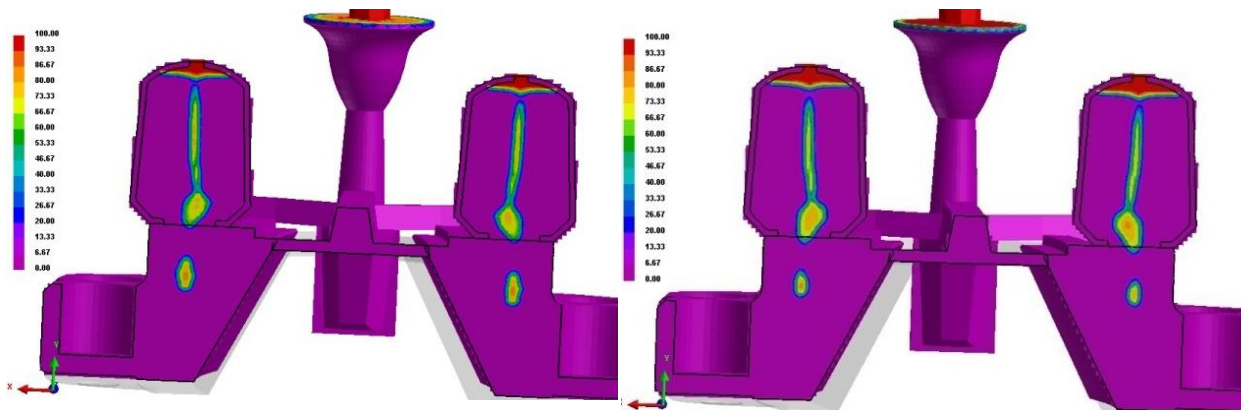


Figura 55 e 56. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).

Observando as figuras 53 a 56, verificamos que para esta opção prevê-se a possibilidade de porosidade em todas as opções de temperatura de vazamento. Na figura 54, o resultado obtido a mesma temperatura mas para um CFSP de 0.8, foi muito semelhante.

○ Opção C - Camisa exotérmica 3

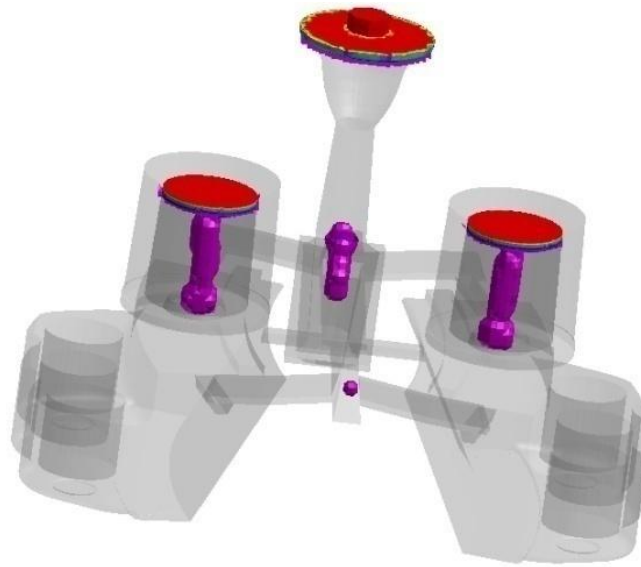


Figura 57. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

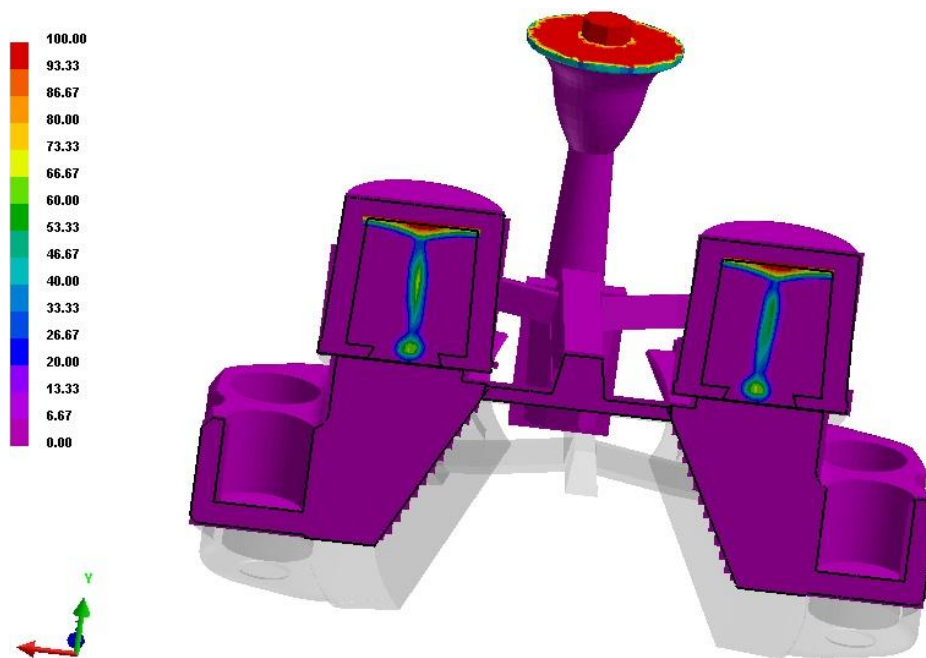


Figura 58. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

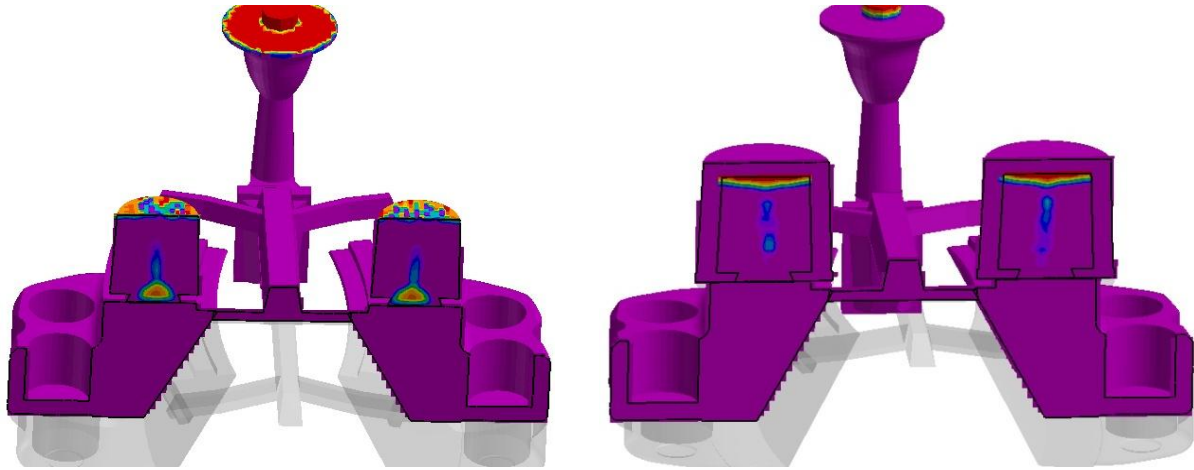


Figura 59 e 60. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).

Em todas as simulações feitas com esta opção prevêem a isenção de porosidade nas peças, sendo a opção mais valida nesta hipótese.

4.3. Hipótese 3

Nesta hipótese procedemos a mais modificações na gitagem, aumentando o número de ataques a encher a cavidade da peça, sendo agora 5 ataques para cada peça. Neste caso só foi feita a simulação para dois tipos de camisas exotérmicas (2 e 3), visto que a camisa exotérmica 1, não seria a melhor solução, através dos resultados nas simulações da hipótese 1 e 2. O peso desta gitagem é de 31kg aproximadamente.

✓ Simulação da peça A173

○ Opção B - Camisa exotérmica 2

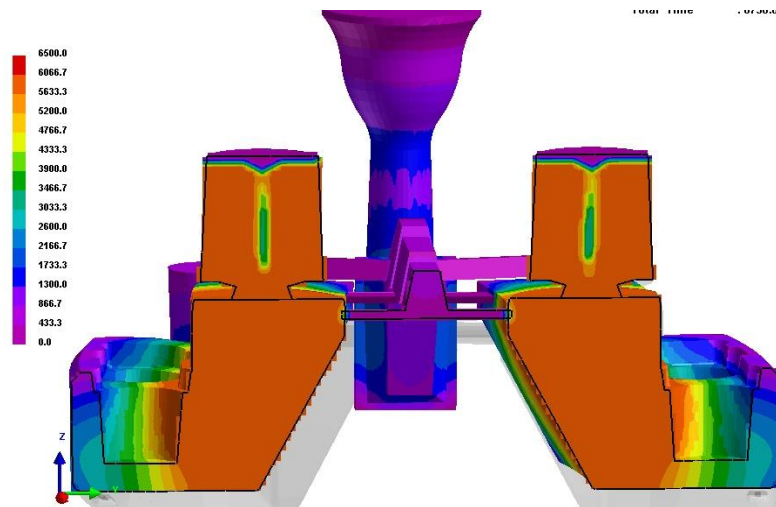


Figura 61. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C).

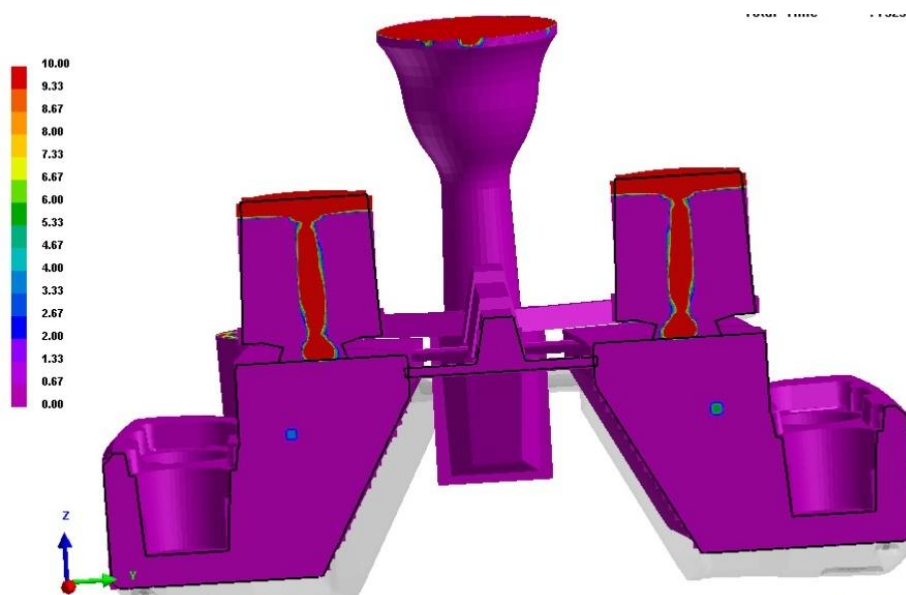


Figura 62. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

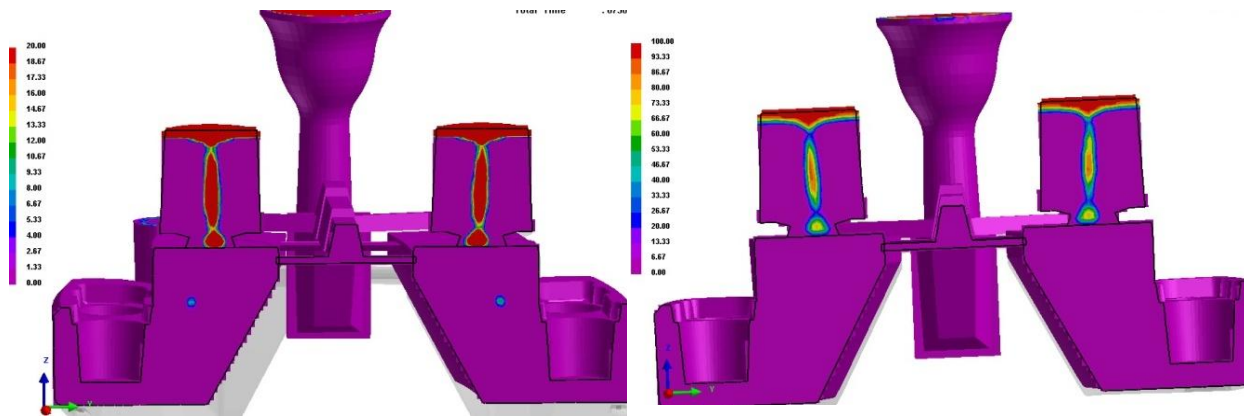


Figura 63 e 64. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).

Relativamente a esta opção reparamos que para esta peça a simulação prevê rechupes para temperaturas de vazamento de 1310°C e 1340°C (figuras 62 e 63), enquanto a 1370°C já não prevê (figura 64).

- Opção C - Camisa exotérmica 3

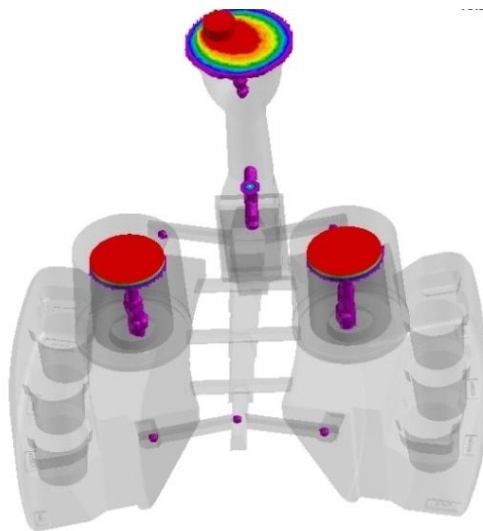


Figura 65. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

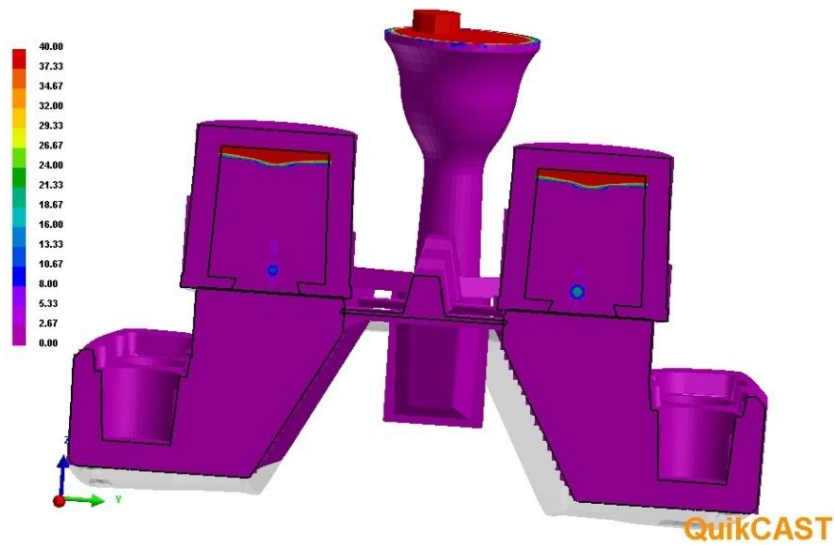


Figura 66. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFSP = 0.6).

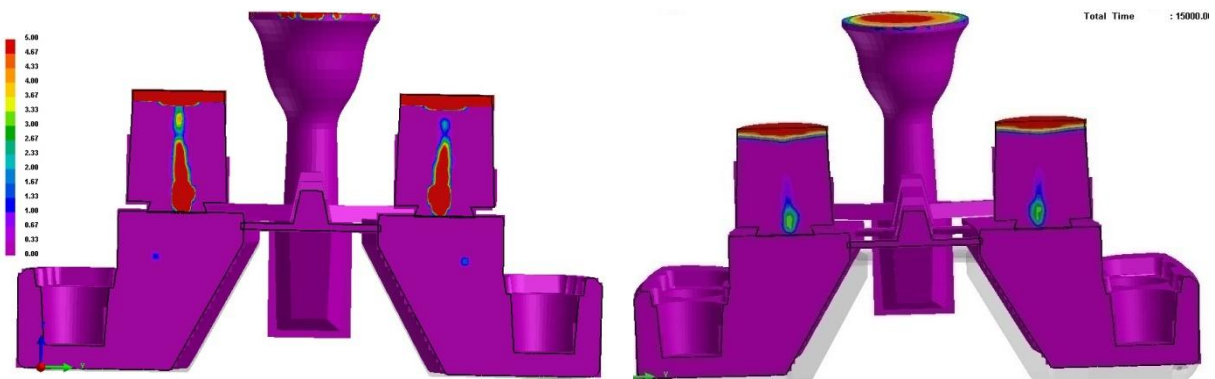


Figura 67 e 68. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFSP = 0.6).

Apenas a uma temperatura de vazamento de 1310°C (figura 67), na simulação desta peça A173, se previa o aparecimento de rechupe. De resto nenhuma das outras temperaturas (1340°C e 1370°C) apresentava rechupe (figura 66 e 68).

- Simulação da peça B174
 - Opção B - Camisa exotérmica 2

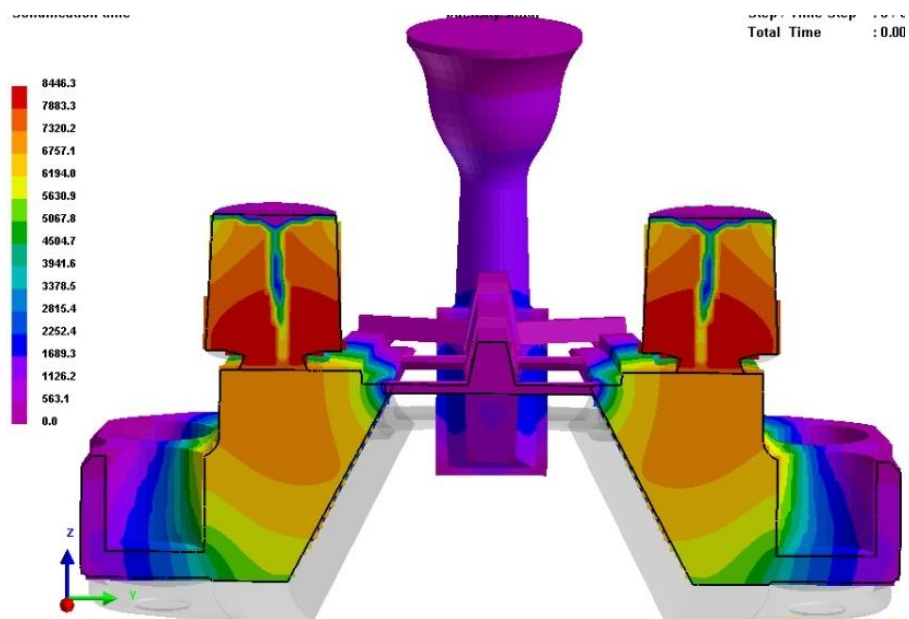


Figura 69. Resultado do tempo de solidificação da simulação visto em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C).

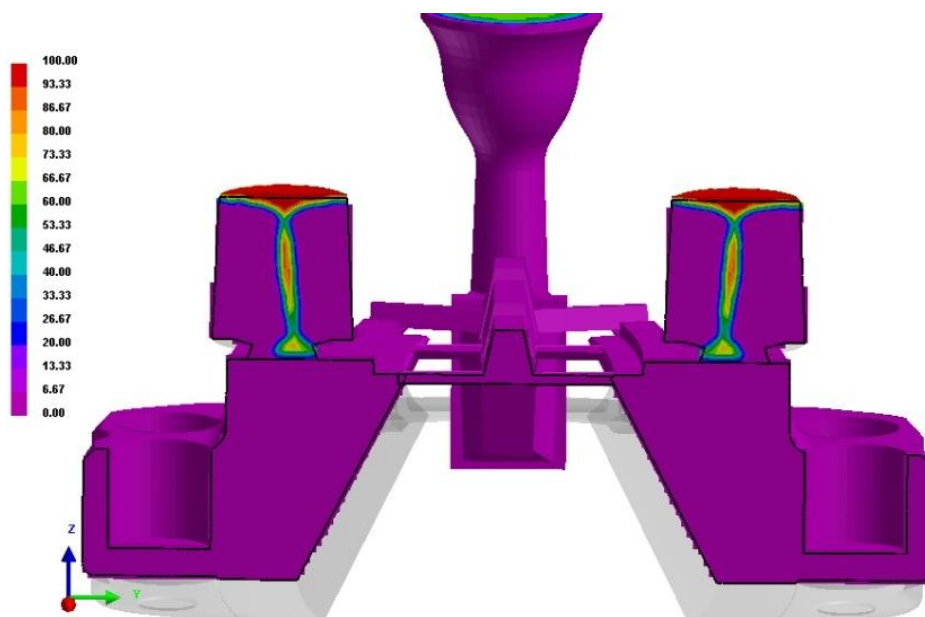


Figura 70. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.6).

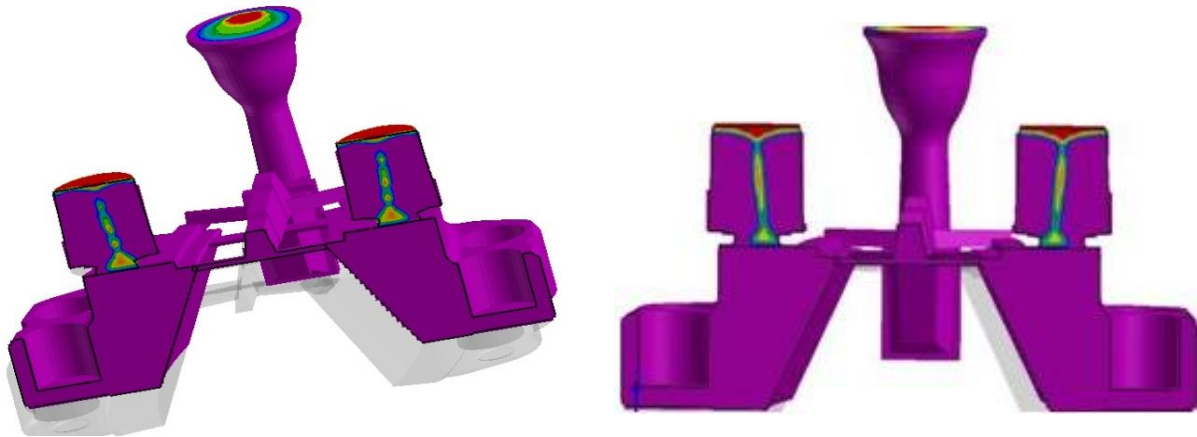


Figura 71 e 72. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFS = 0.6).

○ Opção C - Camisa exotérmica 3

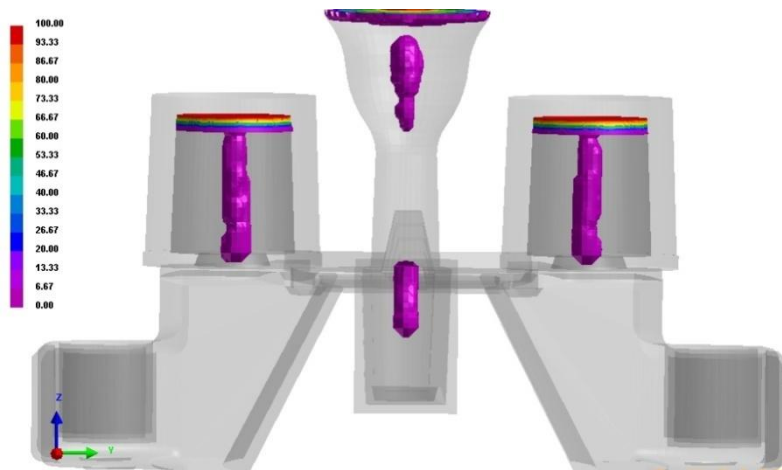


Figura 73. Resultado da macroporosidade da simulação no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.6).

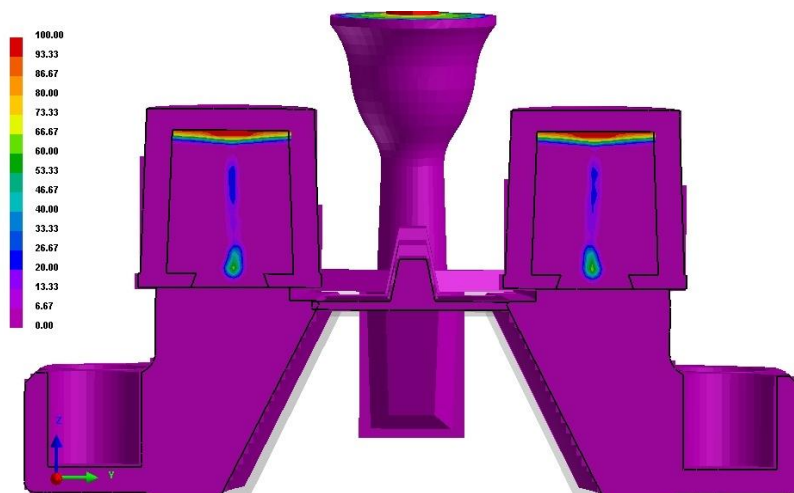


Figura 74. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.6).

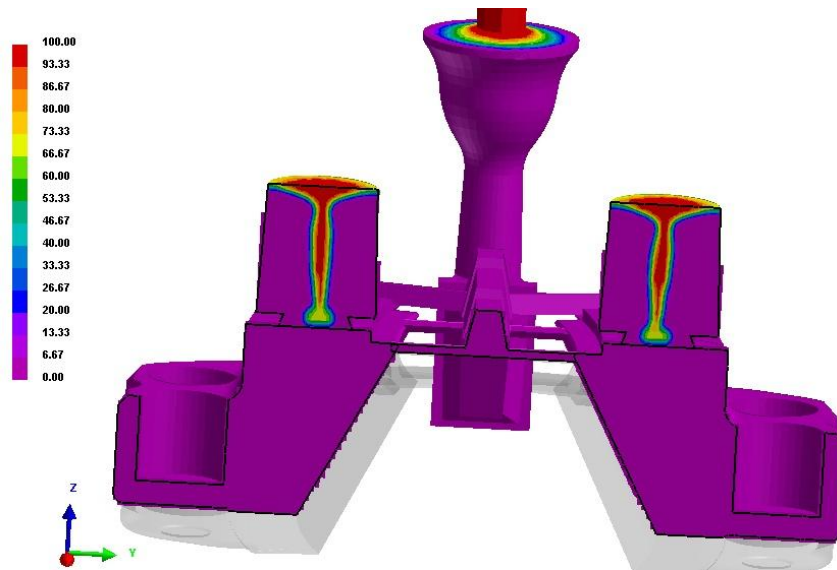


Figura 75. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1340°C e CFS = 0.8).

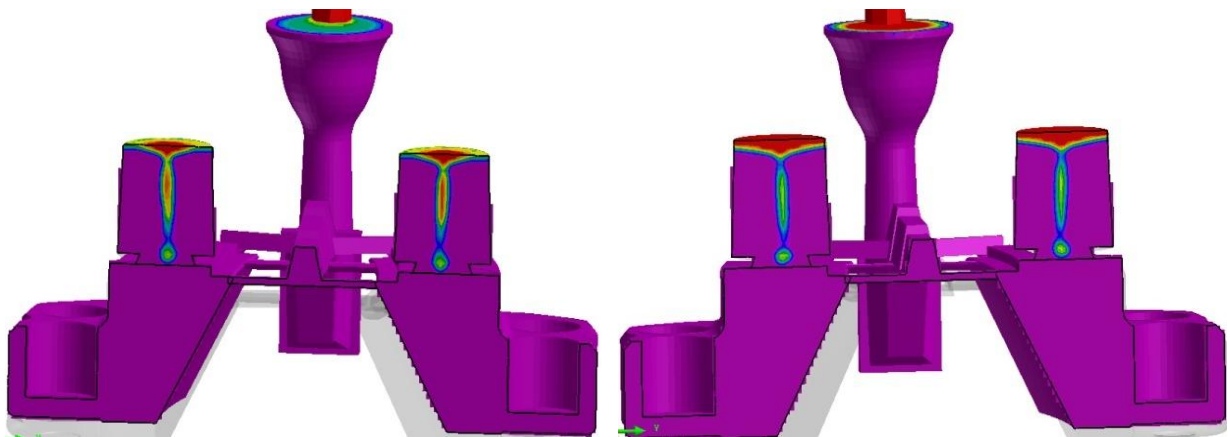


Figura 76 e 77. Resultado da macroporosidade da simulação vista em corte no VisualCAST (temperatura de vazamento 1310°C (esquerda) e 1370°C (direita) e CFS = 0.6).

Nesta hipótese, em nenhuma das opções estudadas (com camisa 2 e 3) e simulações efectuadas se prevê aparecimento de rechupes na peça, como mostram as figuras 70 a 77, mostrando que qualquer uma das camisas exotérmicas nesta peça B174 é uma boa opção.

A tabela X representa os valores da velocidade na zona dos ataques durante o enchimento das cavidades para as diferentes hipóteses, que em muitos casos pode ser crítico para o aparecimento de problemas como as inclusões de areia devido a turbulência durante o enchimento (ver em anexo imagens das simulações).

Tabela X. Velocidade nos ataques durante o enchimento das cavidades das hipóteses estudadas

Peça	Velocidade nos ataques durante o enchimento (m/s)		
	Hipótese nº 1	Hipótese nº 2	Hipótese nº 3
A173	0,2-0,5	0,3-0,5	0,35-0,5
B174	0,2-0,4	0,3-0,6	0,15-0,3

✓ **Fazendo um resumo dos resultados obtidos:**

Podemos dizer que opção B e C (camisas exotérmicas de geometria igual e ambas do mesmo fornecedor e com as mesmas propriedades, diferenciando no tamanho e modulo), obteve melhores resultados nas duas peças do que a as obtidas com a opção A (o tempo de queima da camisa é menor que as duas anteriores o que influencia o seu desempenho), sendo que a camisa 1 não será usada em nenhum dos trabalhos futuros desta peça.

Relativamente as hipóteses apresentadas, as que são de maior utilidade e para produção são a 1 e a 3 (a hipótese 2 foi descartada para uma eventual produção, ficando a hipótese 3 para produção futura devido aos resultados mais satisfatórios) sendo que em cada hipótese a melhor camisa exotérmica a utilizar será a número 3. Para validação iremos mostrar a hipótese 1, com a opção C.

Relativamente a tabela X, observa-se que na hipótese 1 e 3 a velocidade nos ataques é menor, havendo menor turbulência durante o enchimento das cavidades.

5. Validação da peça

As peças relativas à hipótese 1 foram validadas experimentalmente, tendo sido escolhida a opção C com camisa exotérmica 3 (140/150mm), com as seguintes condições de temperatura de vazamento (no intervalo de 1340 e 1345°C), com um tempo de vazamento de 30 segundos. Em seguida estão apresentados os resultados dessa validação experimental.

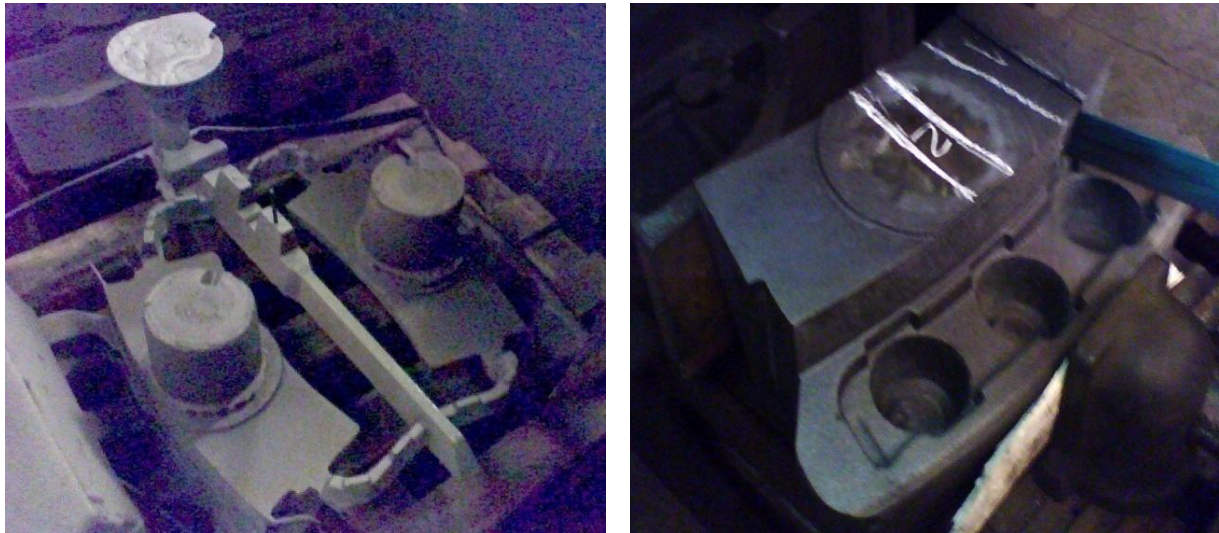


Figura 78. Peça A173 em da hipótese 1 (que foi produzida) à esquerda e corte da peça com destaque para o nº2 o local onde aparecia rechope à direita.

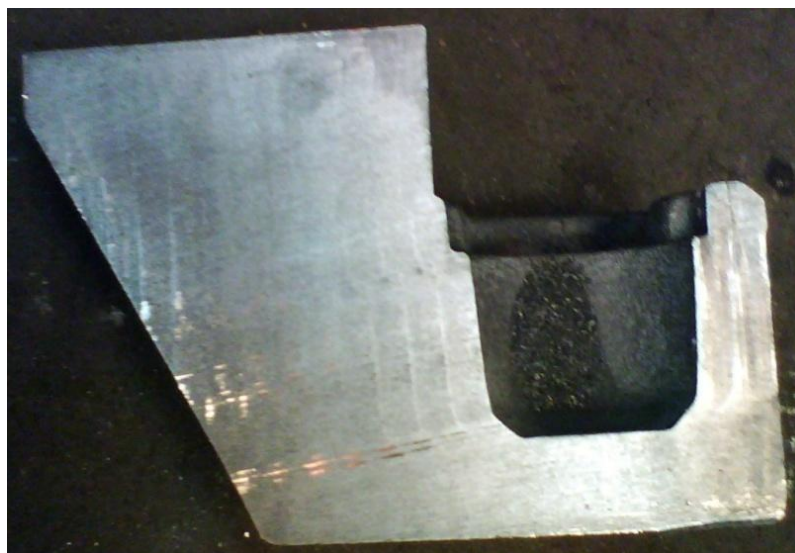


Figura 79. Imagem do corte da peça na zona nº 2, onde agora não aparece rechope.

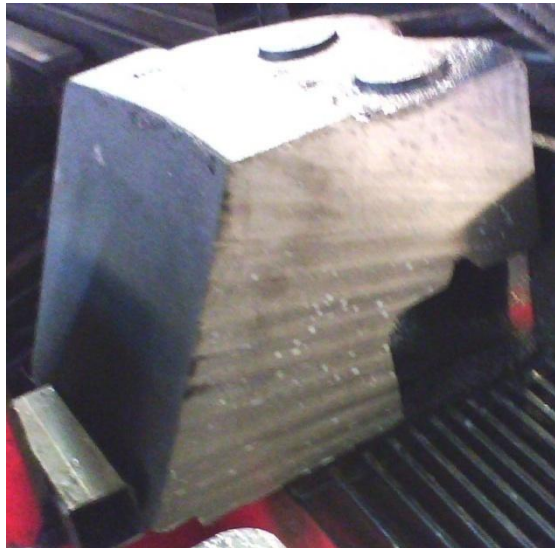


Figura 80. Imagem em corte da peça B174, sem aparecimento de rechupe.

Para além das imagens apresentadas, também se procedeu aos ensaios de raio-X, não apresentando as duas peças porosidade.

As hipóteses 3 (de 5 ataques) irão ser produzidas pela DURITCAST posteriormente, que substituirá a opção de hipótese agora produzida. A hipótese 2 foi descartada devido aos resultados de simulação obtidos.



Figura 81 e 82. Imagem em corte do alimentador de topo (da camisa exotérmica) da peça A173, com rechupe (à esquerda) e parte do alimentador em contacto com a peça com um ligeiro rechupe na zona assinalada (à direita), como previam as simulações efectuadas.

Tabela XI. Percentagem de refugo associado a produção em estudo.

	A173	B174
Refugo	8%	11%
Peças produzidas	400	100

A percentagem de refugo apresentada ocorreu em grande parte a mau enchimento das cavidades e inclusões de areias na peça, não havendo casos de porosidade.

6. Conclusão

Como conclusão desta dissertação, podemos referir alguns pontos:

1. A potencialidade do programa de simulação QuikCAST na ajuda na indústria de fundição, através da previsão de defeitos, diminuindo assim as taxas de refugo nomeadamente na DURITCAST.
2. O aumento da eficiência do metal vazado nas peças produzidas, nomeadamente na A173 e B174.

Relativamente ao ponto 1, convém salientar que a curva de aprendizagem do programa é acentuada, sendo o software de fácil aprendizagem (o malhamento é automático, facilitando os procedimentos seguintes). Os pontos mais importantes deste programa são a definição da grelha e malha (devendo rondar 3-6 milhões de células, para uma simulação com resultados mais fiáveis). O tempo de simulação é bastante rápido (dependendo da malha escolhida e espessura da peça) em comparação com outros softwares, fornecendo assim resultados em pouco tempo, permitindo várias hipóteses e modificações nas gitegens antes de entrar na linha de produção.

Os resultados obtidos nomeadamente na hipótese 1, enquadram-se com o que acontece na realidade, como vimos nos resultados da validação.

A calibração do software foi feita com ajuda de outras peças já em produção e devidamente validadas (bem com a ajuda da empresa ESI Group na indicação dos parâmetros de pré-processamento iniciais).

Relativamente ao ponto 2, a validação da produção da hipótese 1, indica que as peças não tinham rechupe, estando em conformidade com as especificações pretendidas pelo cliente. Podemos também notar uma diminuição na quantidade de refugo em comparação com os anos anteriores, sendo as que são refugo, foi devido a outros problemas sem ser a porosidade (inclusões de areia, mau enchimento, grafite degenerada), conseguindo assim eliminar um dos problemas críticos destas peças. A hipótese 2 foi posta de lado sendo optada a hipótese 3 para a nova produção destas peças para se obter um enchimento mais suave e menos turbulento com vista a diminuir a inclusão de areia nas peças.

- **Considerações futuras para trabalhos na empresa DURITCAST usando o QuikCAST**

Relativamente a este aspecto, como já foi sugerido, a hipótese 3 (com opção C de camisa) irá ser produzida substituindo a hipótese 1, com vista a uma melhoria das peças no que diz respeito às inclusões de areias que estão associadas à turbulência no enchimento das peças. Com esta hipótese tem-se em vista a diminuição da velocidade crítica nos ataques, bem como um enchimento mais homogéneo da peça (por cinco locais diferentes em vez de apenas dois).

É de considerar a mais-valia deste programa nesta empresa, devendo ser continuamente melhorados os parâmetros de pré-processamento para se obter resultados ainda mais fiáveis (a nível de outras peças), rentabilizando o tempo e preço da produção.

Referências

- [1] – Flemings, Solidification Processing, Materials Science and Engineering Series, Cap. 7 – Fluid Flow, McGraw-Hill, 1974
- [2] - D. Koshal, Manufacturing Engineer’s Reference Book, Cap. 3 - Metal Casting and Moulding Processes, Elsevier, 1993
- [3] – ASM Metals Handbook, Volume 15 - Casting, Cap. Design Considerations, Gating Design, 1992
- [4] – John Campbell, Castings Practice – The 10 rules of castings, Cap. 2 – Avoid turbulent entrainment, 2004
- [5] – Norma Espanhola UNE – 1563 de 1998
- [6] - “Apontamentos da disciplina de Engenharia Assistida por Computador” do Professor Vítor Martins Augusto
- [7] - <http://www.esi-group.com/products/casting> (ultimo acesso em 20 de Julho 2009)
- [8] - ESIGROUP, “QuikCAST User Manual”, Versão 2009.0

Anexos

1. Explicação mais detalhada do programa QuikCAST

O programa de simulação QuikCAST apresenta algumas considerações que necessitam maior aprofundamento, passando de seguida a explicar algumas que não foram devidamente explícitas no método experimental, em especial o “Input Data Check” e “Solidification Material Parameters”.

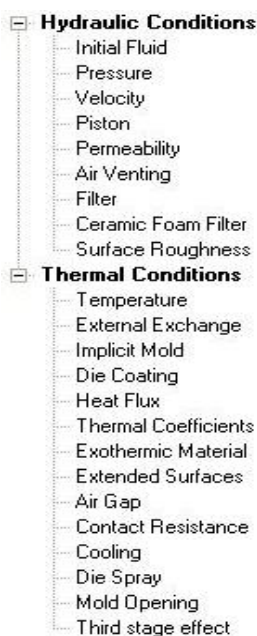


Figura 83. Submenu “input data check” do menu “Process”.

Dentro destes parâmetros de pré-processamento devemos escolher os seguintes:

“Hydraulic Conditions”:

- ✓ **Initial Fluid** – fluido inicial de entrada na cavidade (conhecido por “Inlet”)

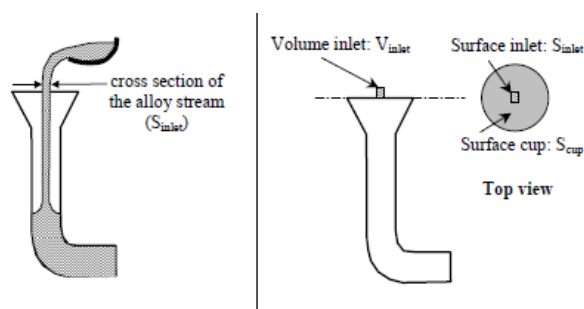


Figura 84. Imagem explicativa do que é o volume “inlet” no QuikCAST.

- ✓ **Velocity** – velocidade de enchimento, indicando em função desta o tempo de enchimento da cavidade de moldação.
- ✓ **Permeability** – permeabilidade da moldação (areira verde ou autosecativa)

- ✓ **Ceramic Foam Filter** – uso de filtro cerâmico, com escolha da espessura e ppi do filtro.
- ✓ **Surface Roughness** – rugosidade das paredes da moldação (os valores variam entre -1 e 1, ver imagem seguinte).

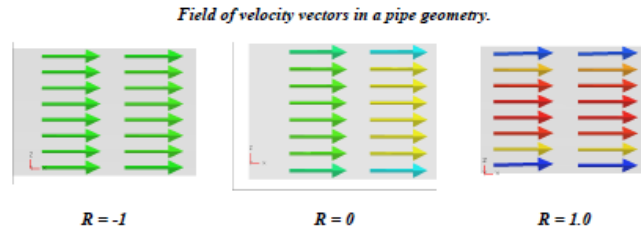


Figura 85. Explicação visual do parâmetro de pré-processamento “Surface Roughness”.

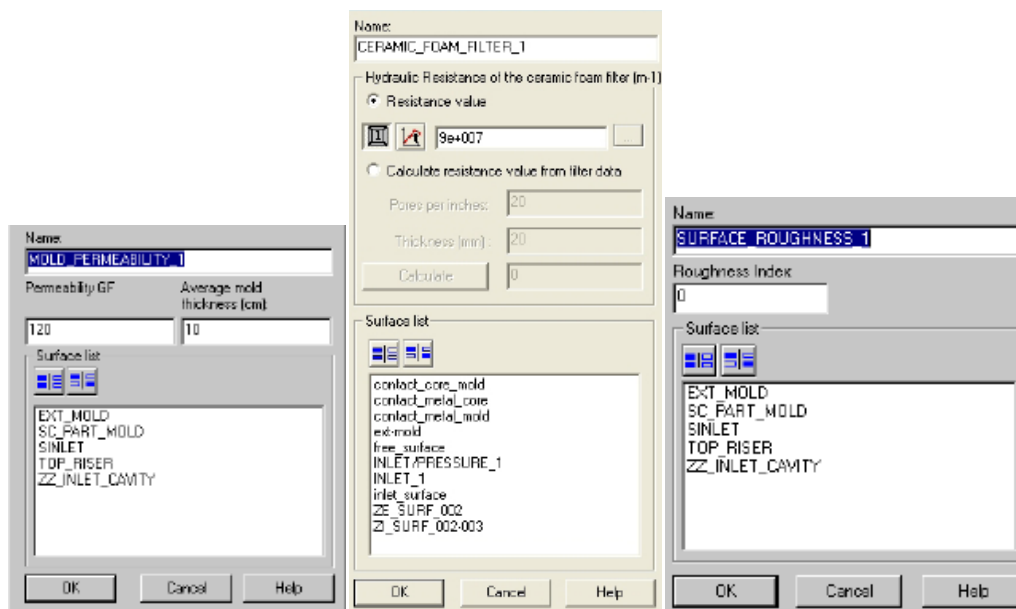


Figura 86. Menus dos parâmetros de pré-processamento, “Permeability”, “Ceramic Foam Filter” e “Surface Roughness”, respectivamente.

“Thermal Conditions”:

- ✓ **Temperature** – temperatura inicial de vazamento
- ✓ **External Exchange** – troca com o exterior
- ✓ **Exothermic Material** – propriedades das camisas exotérmicas, podendo escolher o poder da camisa ou 3 parâmetros (energia, temperatura de ignição e tempo de queima)
- ✓ **Extended surfaces** – para o cálculo da função dos arrefecedores na simulação (neste caso não foi usado).
- ✓ **Contact Resistance** – resistência do metal durante enchimento

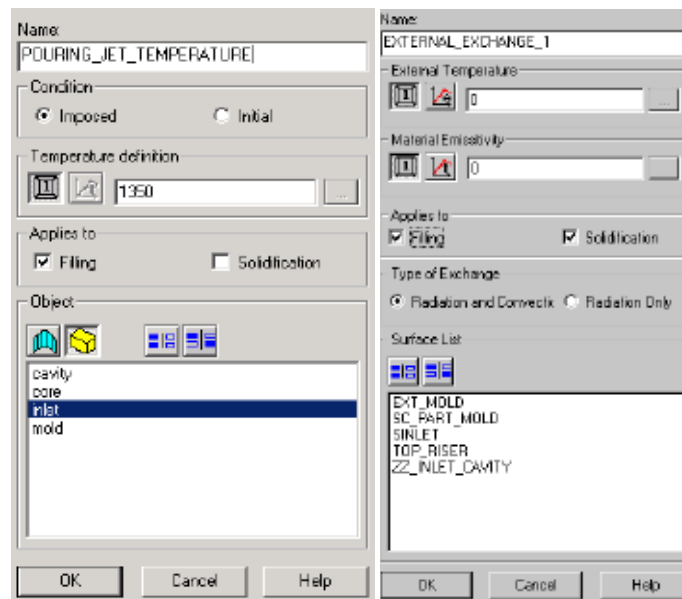


Figura 87. Menus dos parâmetros de pré-processamento, “Temperature” e “External Exchange” respectivamente.

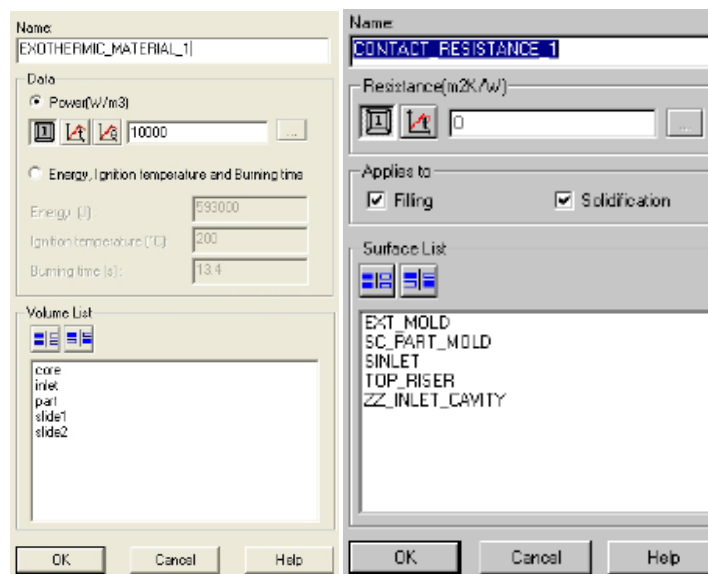


Figura 88. Menus dos parâmetros de pré-processamento, “Exothermic Material” e “Contact Resistance” respectivamente.

Relativamente ao menu “Solidification Material Parameters”, a prioridade vai para o “Shrinkage calculation” e “Shrinkage Parameters”. No 1º temos a opção de escolher o valor para:

- **“Critical fraction solid for piping formation”**
- **“Critical fraction solid for porosity formation”**

Na 2ª opção podemos escolher entre:

- **“Global contraction factor”** – pode-se escolher o coeficiente de expansão do grafite.
- **“Based on density variation”** – o mais comum usado nas simulações, que faz o cálculo baseado na curva da densidade da liga escolhida.

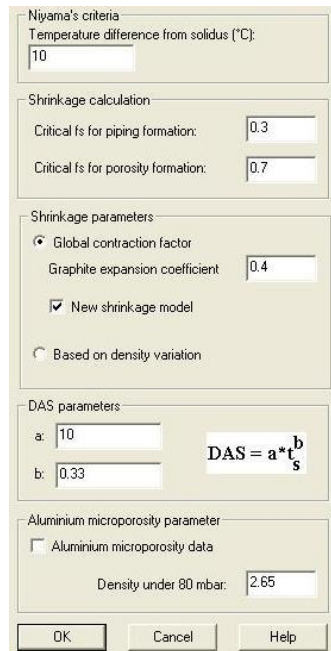


Figura 89. Submenu “solidification material parameters” do menu “Process”.

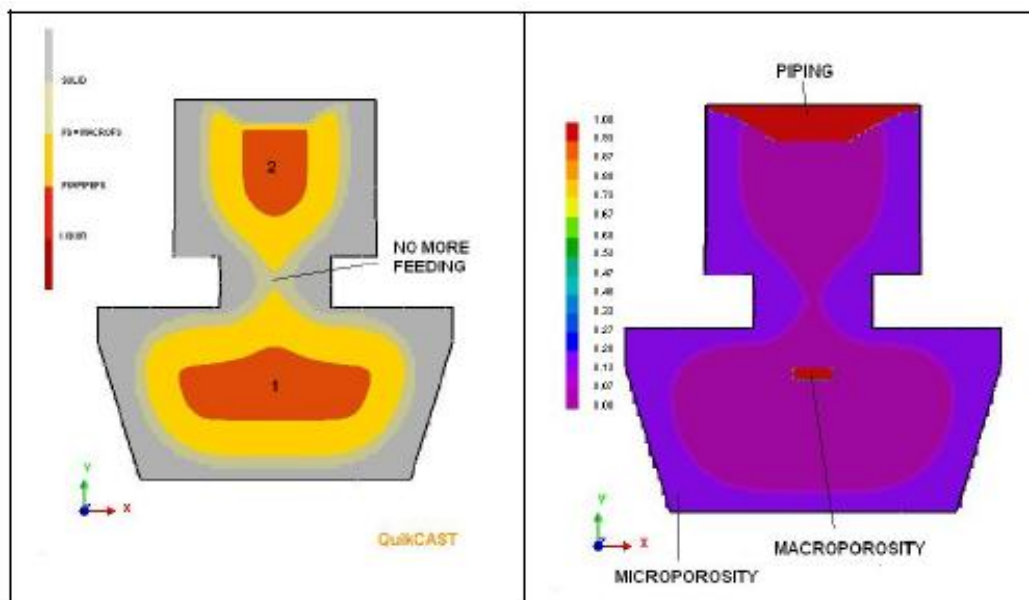


Figura 90. Explicação do CFSP e CFSPipping.

Na figura 91 mostra as opções de cálculo de simulação do QuikCAST, enchimento, solidificação ou ambos.

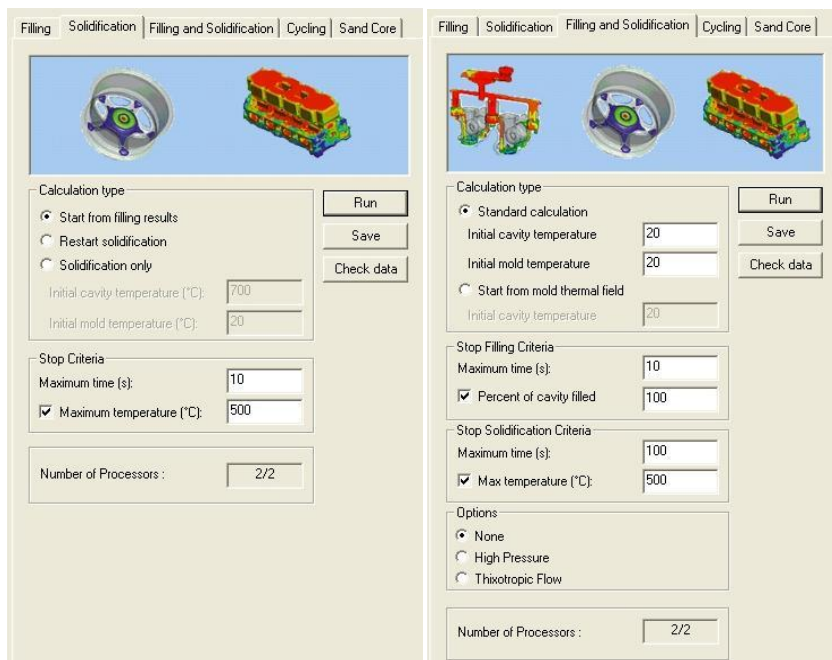


Figura 91. Submenu de escolha de cálculo da simulação [7].

2. Cálculo da Gitagem das diversas hipóteses

Os cálculos apresentados em seguida foram desenvolvidos em parceria com o Eng.^o Luís Sierra.

Calculo da secção de ataque					
Número de objectos	Peso do objecto	Factor de fricção	Tempo de vazamento	Secção de ataque por peça	nº de ataques
2	95	0,25	30	958	2
	Peso adicional (por peça)	Peso total		Volumen espac/pc [dm3]	13,0
	30	250		∑V espc [dm3]	26,0
	Espeçsura mínima peça (mm)	Factor N	Tempo sugerido	Tempos sugeridos (por peso)	
	30	2,25	36	Peça fina	30
	Espeçsura média peça (mm)	Factor S		Peça grossa	27
	60	1,7	30	Peça "bloco"	32
				Peça MM	10,3
	Factor Fricção descida	0,8			
	Secção da descida	Massa adicional	Secção do canal de Distribuição	Secção total de ataque	secção de ataque
Relação de Gitagem	1,2	--	1,2	1,0	
Secções mm2	927	0	2298	1915	479
YR= 7,3		Canal descida=	2757,988732		
K= 1,23		Diam. Descida=	59,25858856		
Area alim. ∑Fa=	7,817385866			Secção do ataque=	479

Figura 92. Imagem com o cálculo da secção de ataque para 2 ataques.

Versão:		Calculo da secção de ataque			
Número de objectos	Peso do objecto	Factor de fricção	Tempo de vazamento	Secção de ataque por peça	nº de ataques
2	95	0,25	30	958	3
	Peso adicional (por peça)	Peso total		Volumen espac/pc [dm3]	13,01369863
	28	246		ΣV espc [dm3]	26,02739726
				Tempos sugeridos (por peso)	
	Espessura mínima peça (mm)	Factor N	Tempo sugerido	Peça fina	29,52
	10	2,25	35	Peça grossa	27
	Espessura média peça (mm)	Factor S		Peça "bloco"	31
	60	1,7	30	Peça MM	10,16632653
	Factor Fricção descida	0,8			
	Secção da descida	Massa adicional	Secção do canal de Distribuição	Secção total de ataque	secção de ataque
Relação de Gitagem	1,2	---	1,2	1	
Secções mm2	927	0	2298	1915	319
	$\gamma_R = 7,3$	Canal descida=	2758		
	$K = 1,23$	Diam. Descida=	59		
Area alim. $\Sigma Fa =$	7,692307692			Secção do ataque=	319

Figura 93. Imagem com o cálculo da secção de ataque para 3 ataques.

Calculo da secção de ataque					
Número de objectos	Peso do objecto	Factor de fricção	Tempo de vazamento	Secção de ataque por peça	nº de ataques
2	95	0,25	30	958	5
	Peso adicional (por peça)	Peso total		Volumen espac/pc [dm3]	13,01369863
	25	240		ΣV espc [dm3]	26,02739726
				Tempos sugeridos (por peso)	
	Espessura mínima peça (mm)	Factor N	Tempo sugerido	Peça fina	28,8
	10	2,25	35	Peça grossa	26
	Espessura média peça (mm)	Factor S		Peça "bloco"	31
	60	1,7	29	Peça MM	9,918367347
	Factor Fricção descida	0,8			
	Secção da descida	Massa adicional	Secção do canal de Distribuição	Secção total de ataque	secção de ataque
Relação de Gitagem	1,2	---	1,2	1	
Secções mm2	927	0	2298	1915	192
	$\gamma_R = 7,3$	Canal descida=	2757,988732		
	$K = 1,23$	Diam. Descida=	59,25858856		
Area alim. $\Sigma Fa =$	7,504690432			Secção do ataque=	192

Figura 94. Imagem com o cálculo da secção de ataque para 5 ataques.

3. Resultados extra das simulações visualizados no VisualCAST

O VisualCAST apresenta outras funcionalidades importantes como a visualização simulação do enchimento (quer em função da temperatura, pressão ou velocidade) e solidificação, fracção de sólidos e líquidos, pontos quentes, tempo de solidificação, critério de Niyama, DAS (*"Dendritic Arm Spacing"*). Nestes anexos mostraremos a simulação de enchimento (em função da temperatura e da velocidade) das hipóteses estudadas. A escala

de temperatura (ou da velocidade) indicada ao lado da primeira figura de cada hipótese de enchimento serve de referência para as imagens seguintes.

○ **Enchimento da hipótese 1 da peça A173**

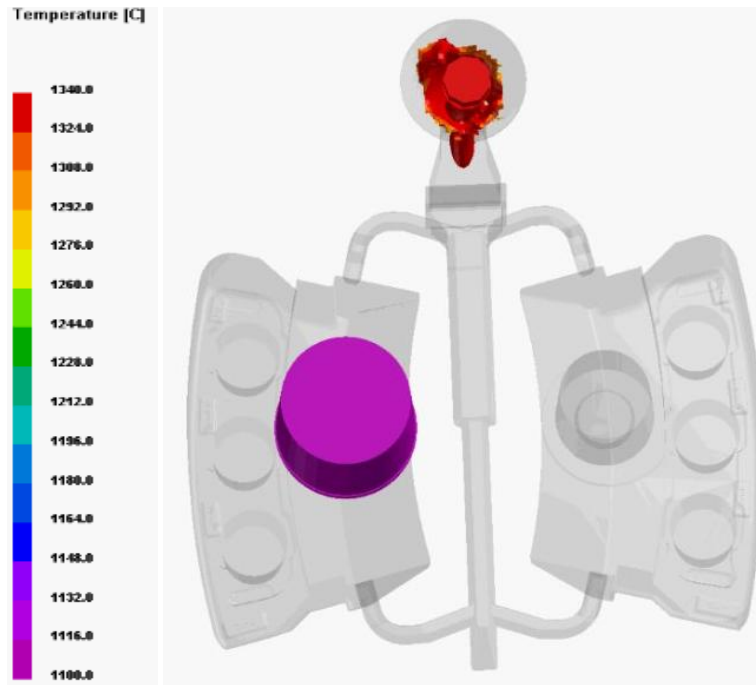


Figura 95. Simulação do enchimento em 2%.

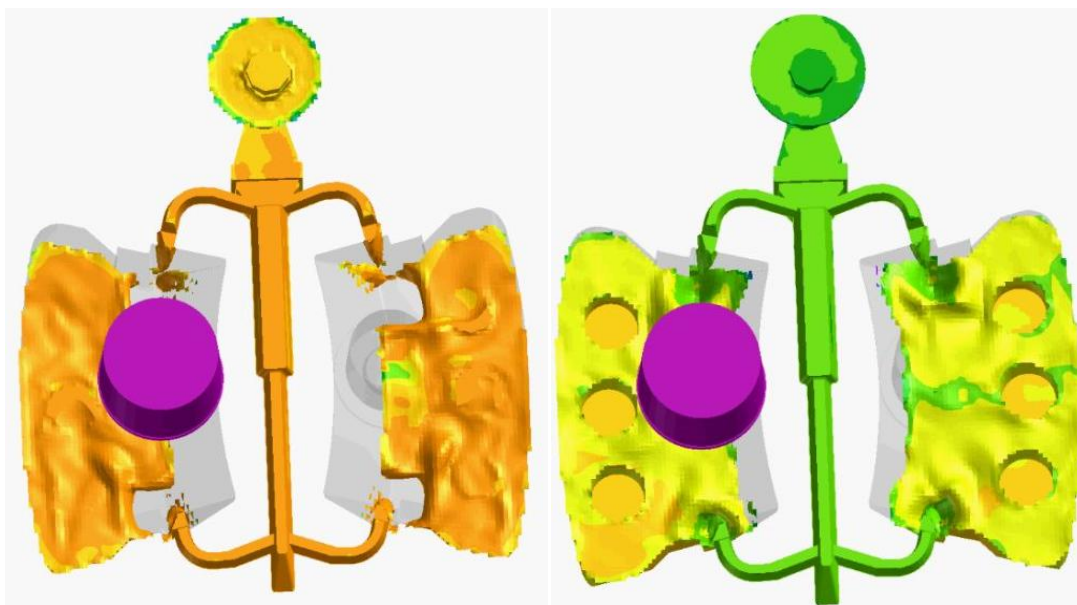


Figura 96 e 97. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita).

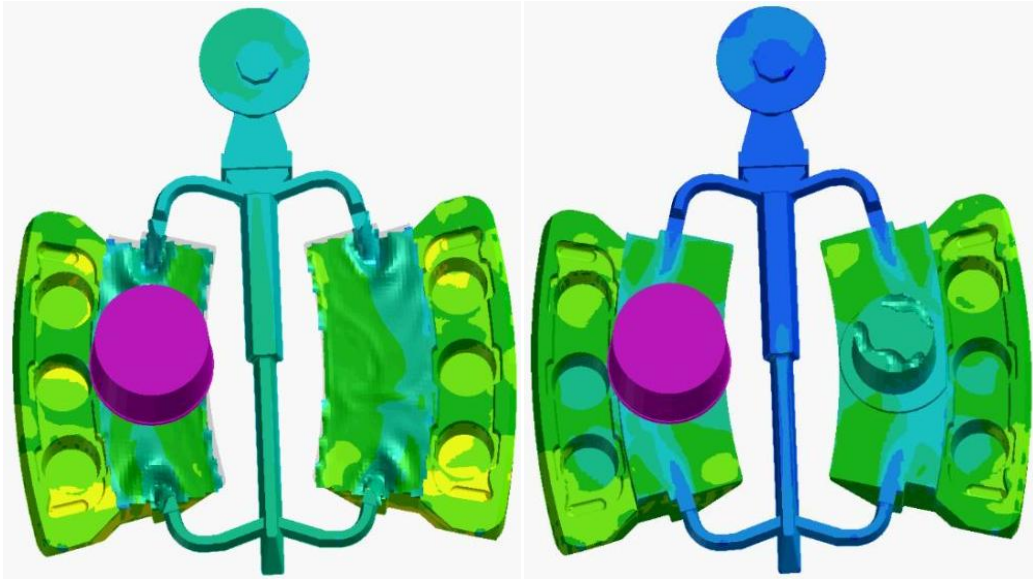


Figura 98 e 99. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 99% (direita).

- Enchimento da hipótese 2 da peça A173

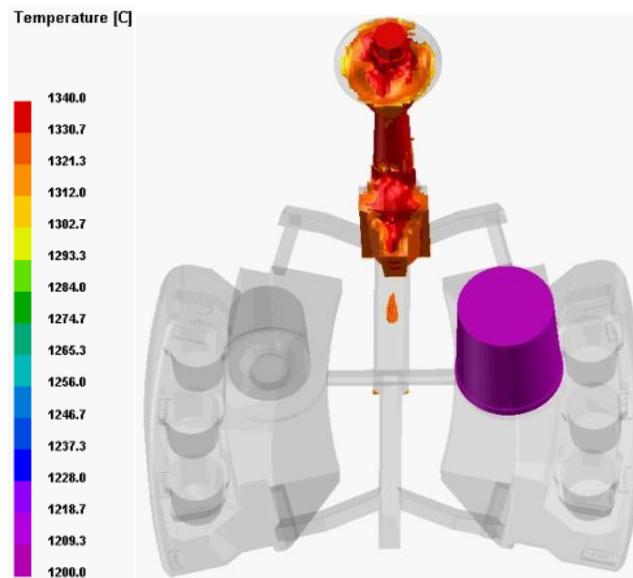


Figura 100. Simulação do enchimento em 5%.

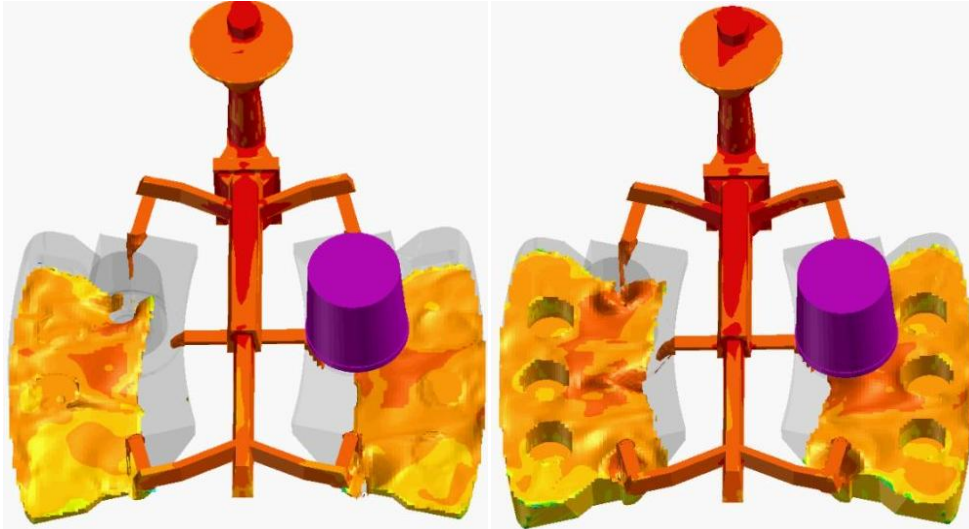


Figura 101 e 102. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita).

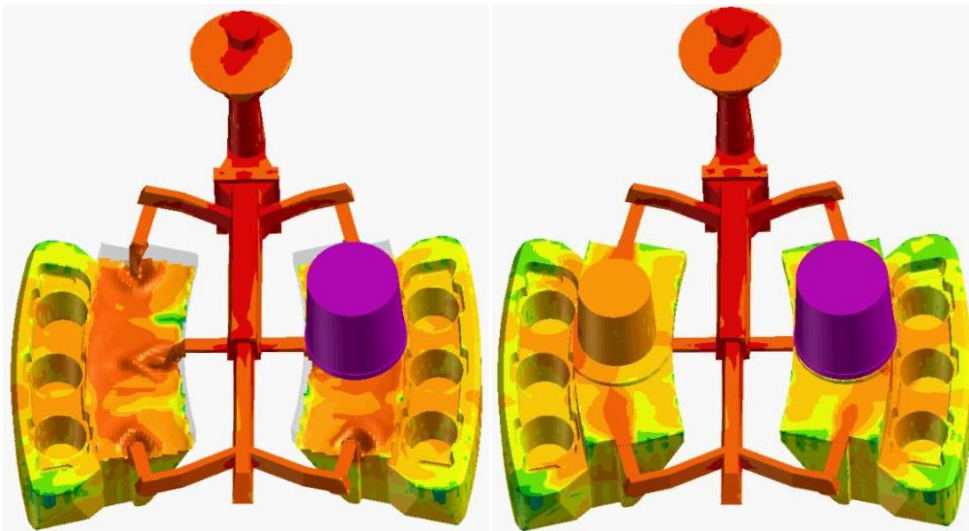


Figura 103 e 104. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita).

- **Enchimento da hipótese 3 da peça A173**

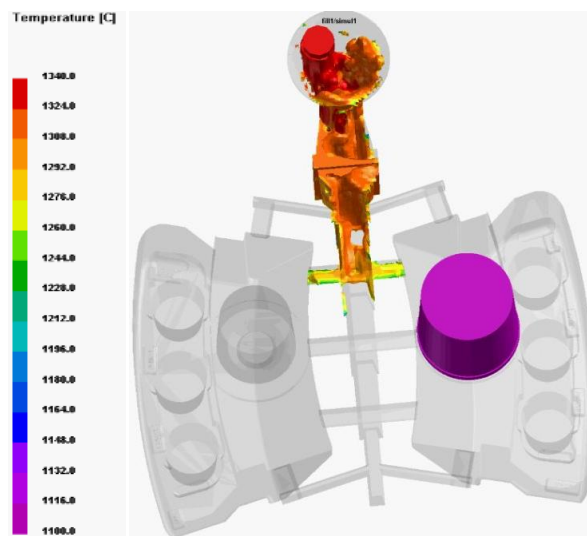


Figura 105. Simulação do enchimento em 5%.

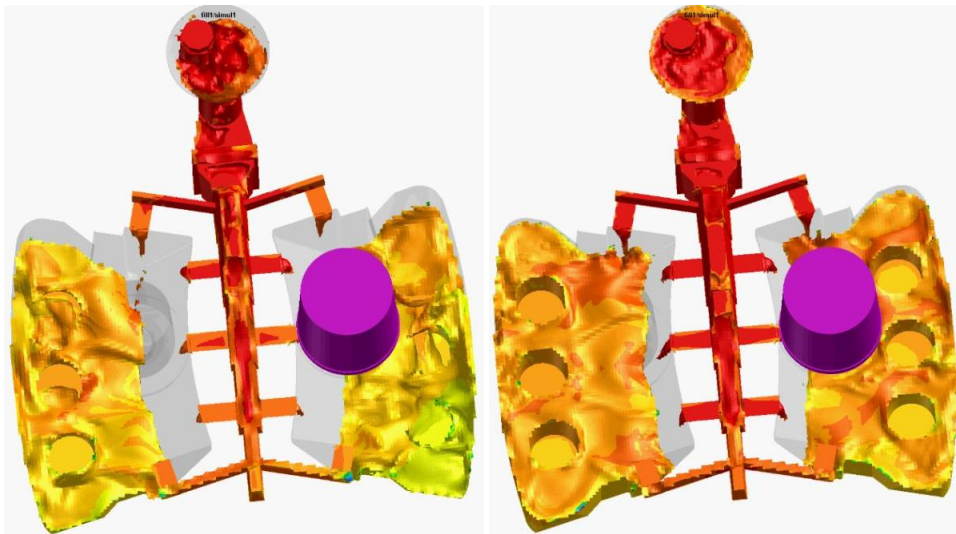


Figura 106 e 107. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita).

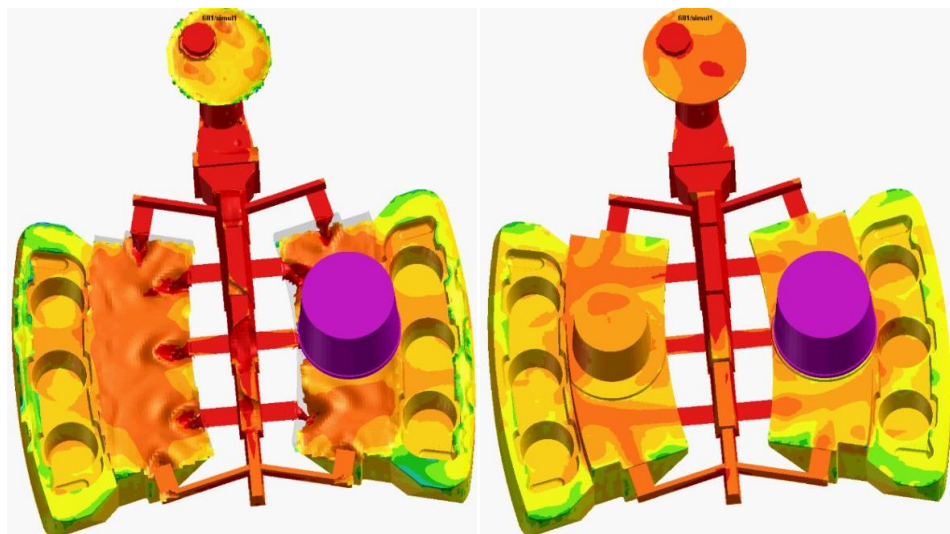


Figura 108 e 109. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita).

○ **Enchimento da hipótese 1 da peça B174**

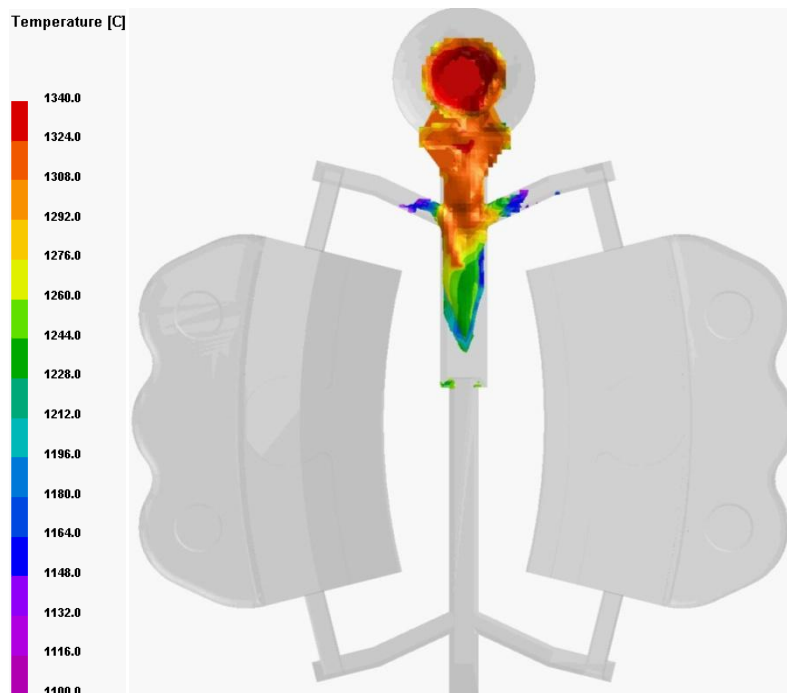


Figura 110. Simulação do enchimento em 5%.

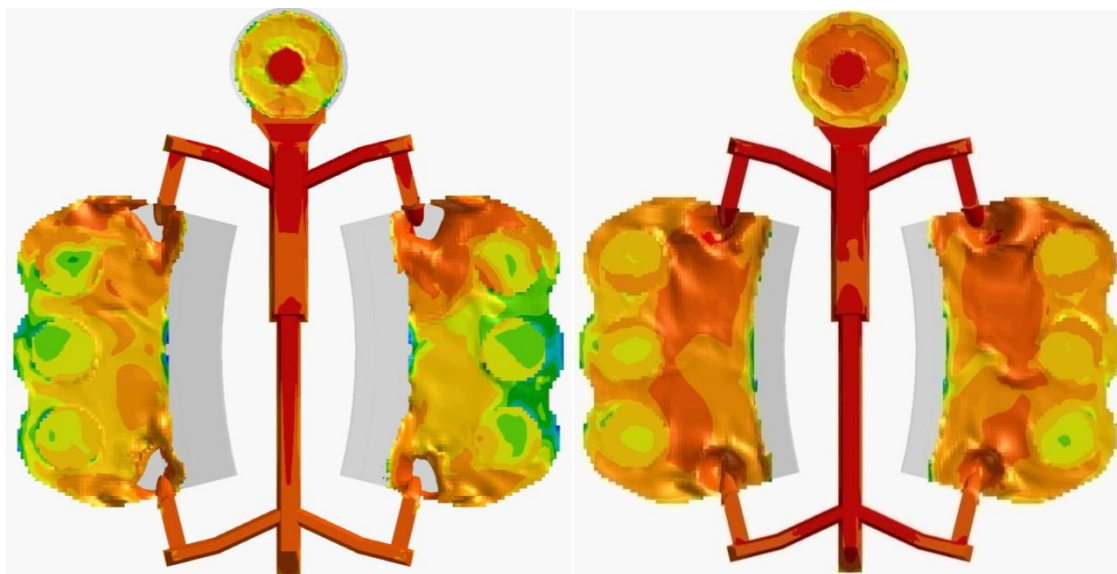


Figura 111 e 112. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita).

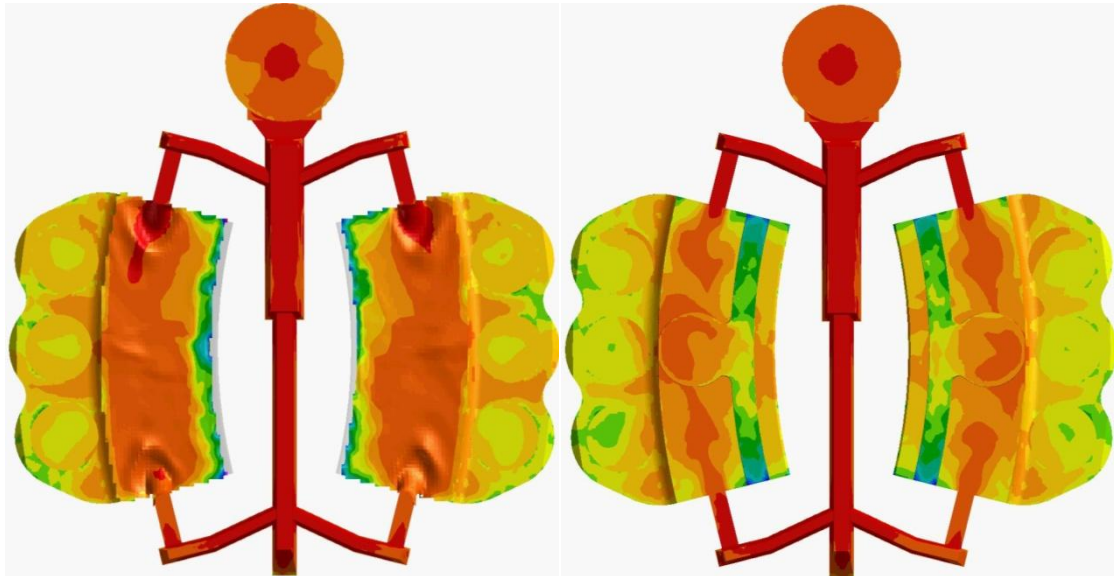


Figura 113 e 114. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita).

○ Enchimento da hipótese 2 da peça B174

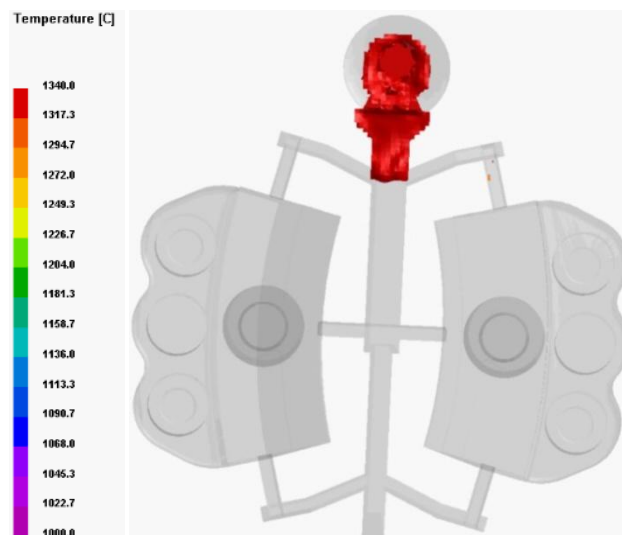


Figura 115. Simulação do enchimento em 5%.

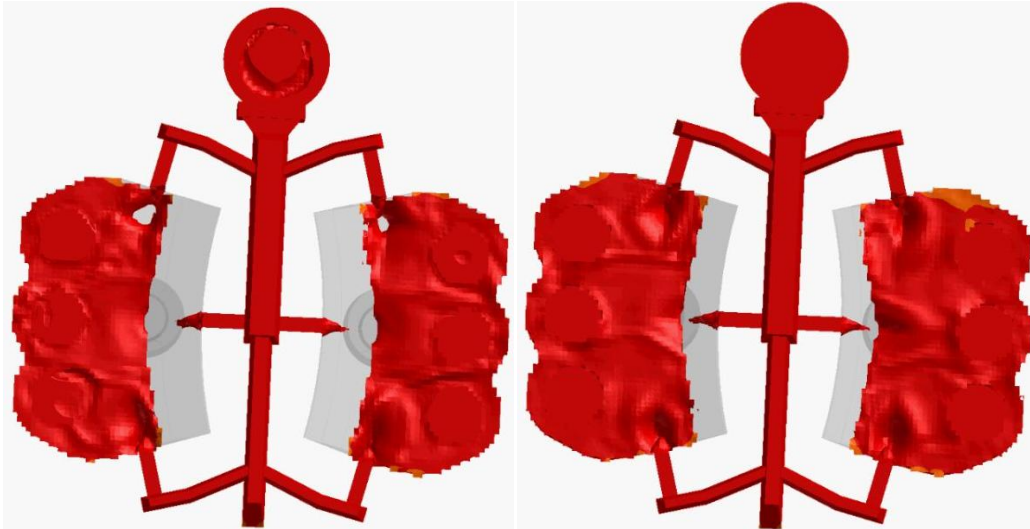


Figura 116 e 117. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita).

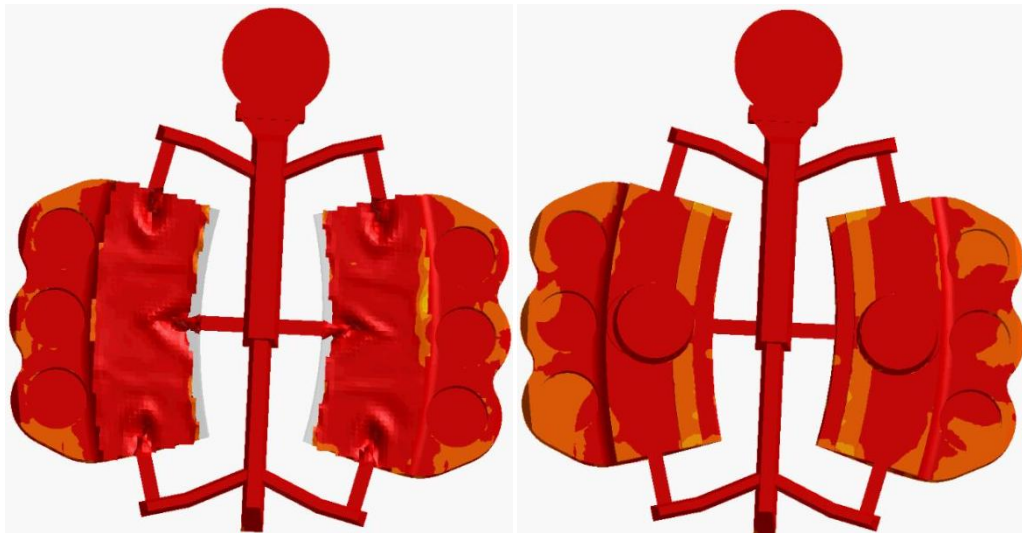


Figura 118 e 119. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita).

- **Enchimento da hipótese 3 da peça B174**

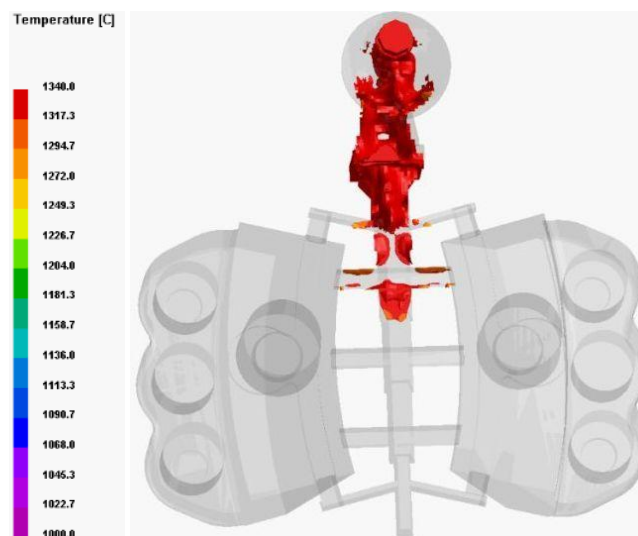


Figura 120. Simulação do enchimento em 5%.

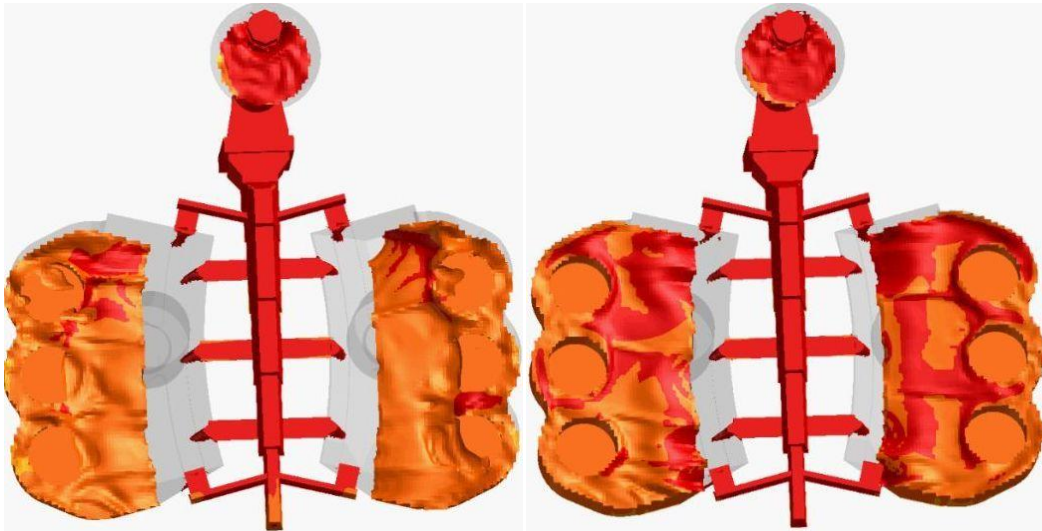


Figura 121 e 122. Simulação do enchimento em 25% (esquerda) e 50% (direita).

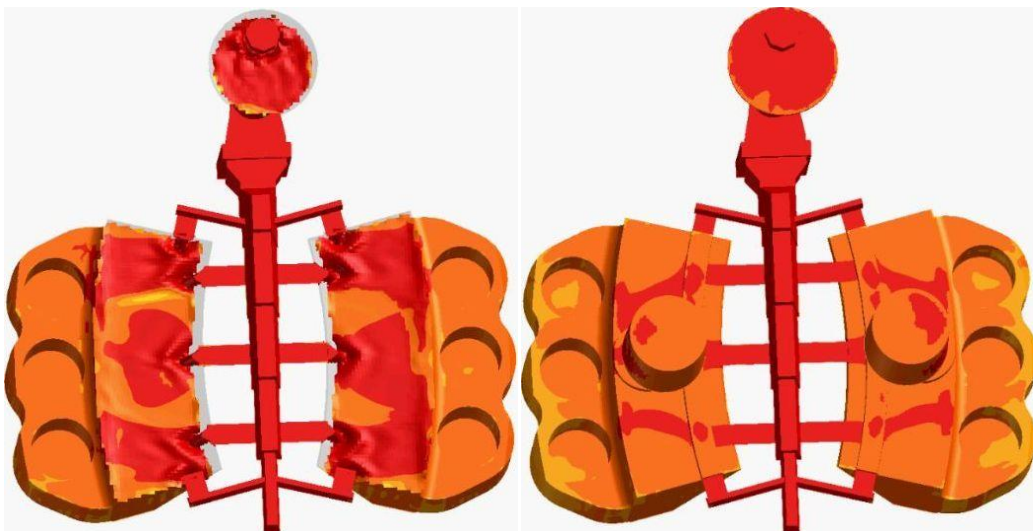


Figura 123 e 124. Simulação do enchimento em 75% (esquerda) e 100% (direita).

- Enchimento em função da velocidade da Hipótese 1

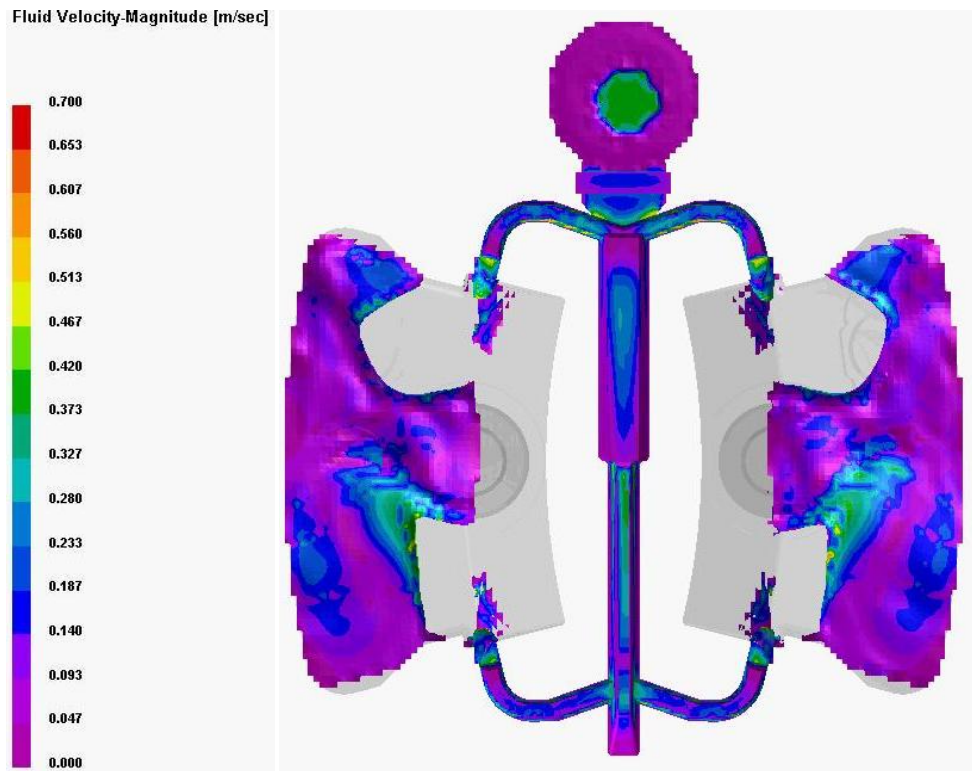


Figura125. Simulação do enchimento em 20% peça A173.

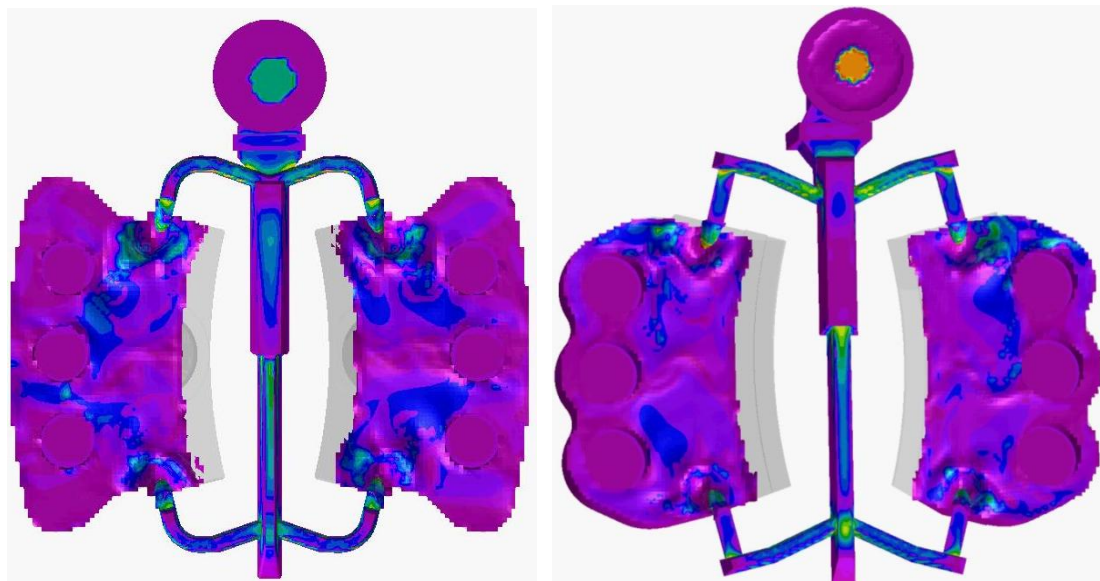


Figura 126 e 127. Simulação do enchimento em 50% peça A173 (esquerda) e B174 (direita)

- Enchimento em função da velocidade da Hipótese 2

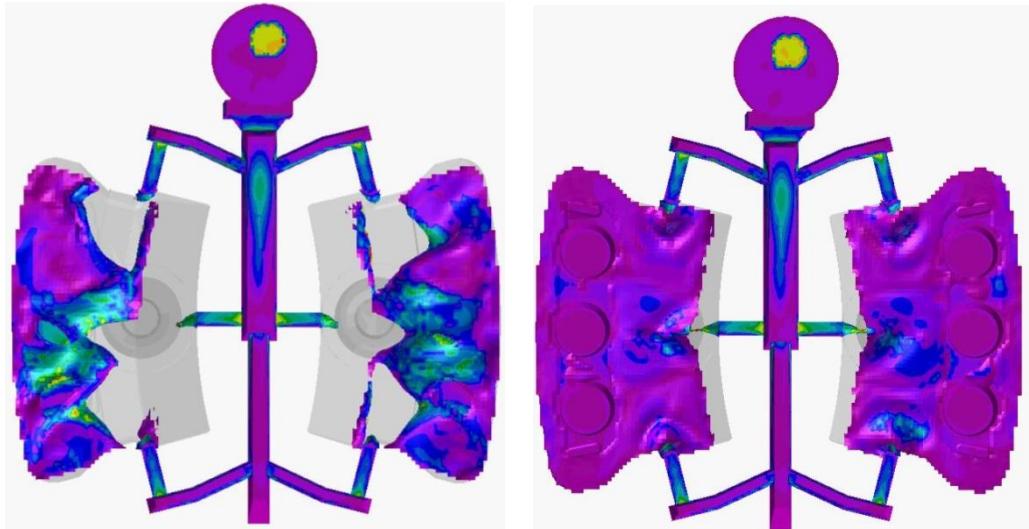


Figura 128 e 129. Simulação do enchimento em 20% (esquerda) e 60% (direita) peça A173, a escala é a mesma da hipótese 1.

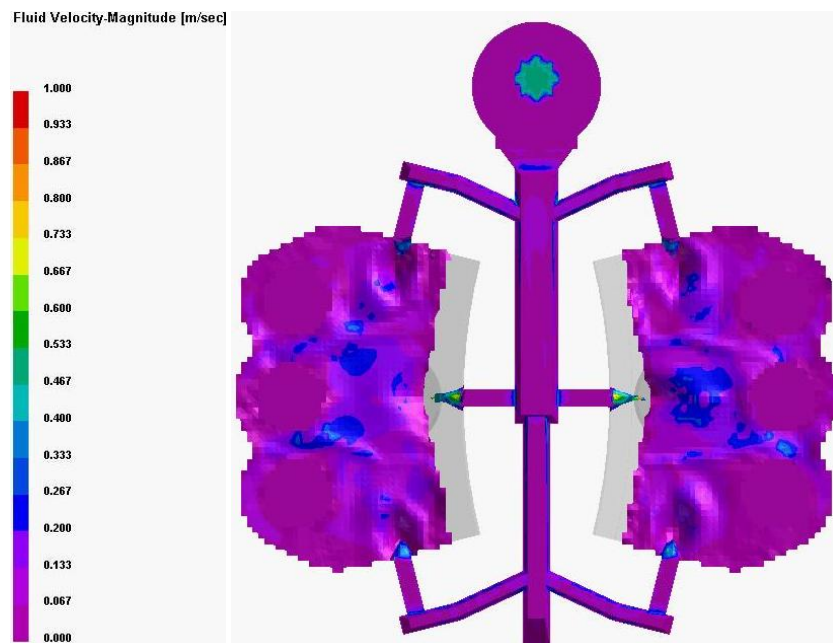


Figura 130. Simulação do enchimento em 65% da peça B174.

○ Enchimento em função da velocidade da Hipótese 3

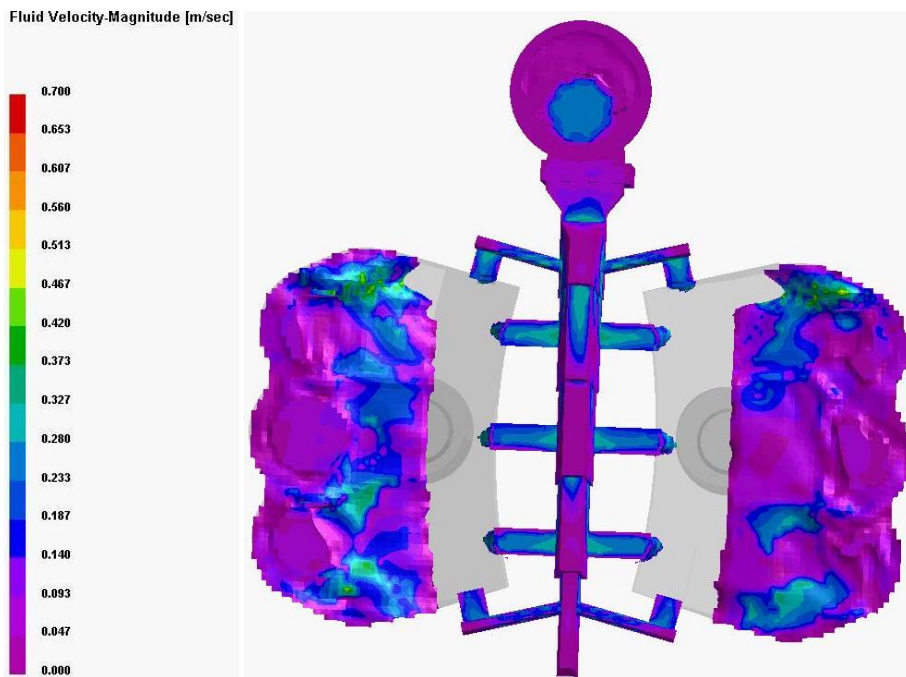


Figura 131. Simulação do enchimento em 25% peça B174.

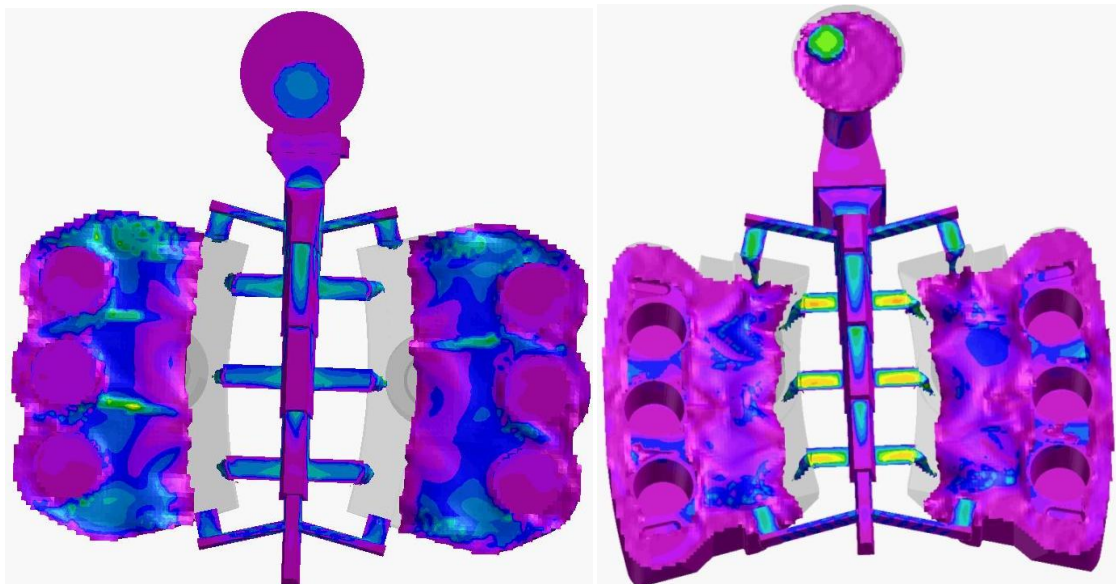


Figura 132 e 133. Simulação do enchimento em 60% peça B174 (direita) e A173 (esquerda)