

Estudo Numérico do Efeito dos Principais Parâmetros de Fundição na Formação de Rechupes em Peças Fundidas

Rui Miguel Marinho Teixeira

Relatório Final da Dissertação/Trabalho de Projeto/Estágio apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de Especialização de Engenharia Mecânica

Trabalho realizado sob a orientação de

Professor Doutor João Pinto Castro Ribeiro

Professor Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes

Dezembro, 2013

“O esforço só é expresso em recompensa, quando uma pessoa se recusa a desistir.”

Napoleon Hill

Agradecimentos

Gostaria de exprimir o meu profundo agradecimento aos meus orientadores, Prof. João Ribeiro e Prof. Hernâni Lopes, por toda a disponibilidade e por partilharem os seus conhecimentos durante o acompanhamento da dissertação.

À FAL, Fundação Alto da Lixa, SA, pela oportunidade de colaboração, em especial ao Engenheiro Cláudio Campos, por toda disponibilidade e pela partilha dos seus conhecimentos e experiência no ramo de fundição.

À família, por ter criado condições para que eu pudesse realizar um dos meus sonhos, a minha formação, que sempre me ajudaram e deram força para tal.

Finalmente, aos meus amigos que sempre me ajudaram e apoiaram durante esta longa caminhada rumo ao sucesso.

Resumo

Um dos principais objetivos deste trabalho consistiu em estudar a potencialidade dos programas numéricos *SOLIDCast* e *FLOWCast* na previsão de defeitos de fabrico do processo de fundição.

Para cumprir tal objetivo, foram executadas simulações com diferentes parâmetros e formulações de fundição. Para cada um deles fez-se a análise do processo de solidificação e de enchimento, com o intuito de avaliar o seu comportamento e possibilidade de aparecimento de defeitos.

Na sequência do trabalho foi realizado um caso de estudo real, em que se pretendia determinar e corrigir as causas da ocorrência de um defeito de fabrico do tipo macrorechupe, que aparecia de forma aleatória numa peça fabricada na FAL. Nesse sentido, realizou-se uma primeira simulação, com os referidos programas numéricos, utilizando os parâmetros e formulação iniciais, correspondentes aos usados no fabrico do produto. Nesta primeira simulação verificou-se que uma possível causa para o aparecimento do rechupe seria a temperatura de vazamento das últimas ser muito baixa. Com o objetivo, de confirmar esse efeito realizaram-se várias simulações com diferentes parâmetros e formulações, tendo sido quantificado qual a importância de cada um deles para o aparecimento deste tipo de defeitos.

No final do trabalho são sugeridas algumas propostas para evitar ou minimizar o aparecimento do defeito ocorrido no caso de estudo. As propostas sugeridas foram previamente simuladas e verificada a sua eficiência na diminuição da formação de rechupes.

Abstract

One of the most important goals of this work was to study the capability of the SOLIDCast FlowCast software to predict manufacturing defects of the casting process.

To fulfil this aim, were performed simulations with different casting parameters and formulations. For each casting parameter and formulation was made an analysis of solidification and filling processes in order to evaluate their behaviour and potential defects manifestation.

In the sequence of the work, was done a real case study, in which it was intended to determine and correct the causes of the occurrence of the manufacturing defect denominated macro shrinkage which have appeared randomly in some pieces manufactured in FAL. Accordingly, we carried out a first simulation, with the referred software using the initial parameters that correspond to the formulation used in the manufacture of the product. In this first simulation it was found that a possible cause for the appearance of shrinkage is due to the low temperature of the last patterns. With the aim of confirming this effect were implemented several simulations with different parameters and formulations, which have been quantified the importance of each to the appearance of such defects.

At the end of the work are suggested and some proposals to avoid or minimize the appearance of the defect occurred in the case study. The proposals have been suggested previously simulated and verified its efficiency in reducing the formation of shrinkage.

Índice

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. <i>Enquadramento do trabalho</i>	2
1.2. <i>Apresentação da empresa FAL-FUNDIÇÃO DO ALTO DA LIXA, S.A.</i>	3
1.3. <i>Motivações</i>	5
1.4. <i>Objectivos e estrutura da dissertação</i>	5
CAPÍTULO 2	7
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1. <i>Tecnologia da fundição</i>	7
2.2. <i>Processo de fundição em areia auto-secativa</i>	8
2.3. <i>Processo de produção de peças fundidas</i>	10
2.3.1. <i>Construção do molde</i>	12
2.4. <i>Solidificação de ligas metálicas</i>	14
2.4.1. <i>Solidificação progressiva vs. direccionada</i>	15
2.4.2. <i>Contração do volume</i>	16
2.4.3. <i>Métodos de análise da solidificação</i>	17
2.4.3.1. <i>Métodos geométricos</i>	17
2.4.3.2. <i>Métodos numéricos</i>	19
2.5. <i>Sistema de alimentação</i>	20
2.5.1. <i>Módulo de arrefecimento dos alimentadores</i>	21
2.5.2. <i>Volume dos alimentadores</i>	23
2.5.3. <i>Determinação da distância da alimentação ou raio de ação</i>	23
2.6. <i>Sistema de Gitagem</i>	25
2.6.1. <i>Princípios de mecânica dos fluidos aplicados ao escoamento de metais líquidos</i>	27
2.6.1.1. <i>Teorema de Bernoulli</i>	27
2.6.1.2. <i>Lei da continuidade</i>	28
2.6.1.3. <i>Número de Reynolds</i>	30
2.6.1.4. <i>Velocidade crítica de enchimento</i>	30
2.6.2. <i>Tempo máximo admissível de enchimento</i>	31
2.6.3. <i>Elementos de um sistema de gitagem</i>	32
2.6.3.1. <i>Bacia de vazamento</i>	32
2.6.3.2. <i>Gito de descida</i>	33
2.6.3.3. <i>Poço do gito de descida</i>	36
2.6.3.4. <i>Canais de distribuição e ataques</i>	37
2.6.4. <i>Filtros cerâmicos nos sistemas de gitagem</i>	39
2.6.4.1. <i>Colocação dos filtros</i>	39

2.7.	<i>Influência da temperatura de vazamento do material</i>	41
2.8.	<i>Programas comerciais de simulação numérica</i>	41
2.8.1.	SOLIDCast®	42
2.8.2.	FLOWCast®	43
2.8.3.	Outros programas de simulação numérica para fundição	43
2.8.4.	Etapas da análise das simulações.....	44
CAPÍTULO 3		46
3.	CASO DE ESTUDO.....	46
3.1.	<i>Introdução ao caso de estudo</i>	46
3.2.	<i>Simulação numérica da formulação inicial</i>	49
3.2.1.	Simulação com SOLIDCast®	49
3.2.2.	Simulação com FLOWCast®	54
3.2.2.1.	Velocidade do metal líquido.....	54
3.2.2.2.	Temperatura do metal líquido	57
3.3.	<i>Simulação numérica do efeito da temperatura de vazamento</i>	59
3.3.1.	Simulação em SOLIDCast	59
3.3.2.	Simulação em FLOWCast	61
3.3.2.1.	Velocidade do fluido	61
3.3.2.2.	Temperatura do metal líquido	64
3.3.3.	Estudo do ponto crítico da temperatura de vazamento	66
3.4.	<i>Simulação numérica do efeito do sistema de gítagem</i>	70
3.4.1.	Ataques nas duas extremidades	70
3.4.1.1.	Simulação em SOLIDCast®	70
3.4.1.2.	Simulação em FLOWCast®	71
3.4.2.	Secção característica dos ataques duas vezes maior que a formulação inicial	72
3.4.2.1.	Simulação em SOLIDCast®	72
3.4.2.2.	Simulação em FLOWCast	72
3.4.3.	Secção característica dos ataques duas vezes menor que a formulação inicial	73
3.4.3.1.	Simulação em SOLIDCast®	73
3.4.3.2.	Simulação em FLOWCast®	74
3.5.	<i>Simulação numérica do efeito do tempo de enchimento</i>	75
3.5.1.	Simulação em SOLIDCast®	75
3.5.2.	Simulação em FLOWCast®	76
CAPÍTULO 4		78
4.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	78
4.1.	<i>Conclusão</i>	78
4.2.	<i>Propostas de melhorias</i>	80
ANEXOS		86
	<i>Anexo 1</i>	86

Aplicação prática do cálculo do sistema de alimentação.....	86
<i>Anexo 2</i>	<i>89</i>
Camisas FOSECO.....	89
<i>Anexo 3</i>	<i>90</i>
Aplicação prática do sistema de enchimento	90
<i>Anexo 4</i>	<i>96</i>
Resumo e apresentação no congresso primeiro encontro de jovens investigadores no Instituto politécnico de Bragança	96

Lista de acrónimos

CAD – Computer Aided Design

CFD – Computational Fluid Dynamics (Dinâmica de fluidos computacional)

FAL – Fundação do Alto da Lixa, S.A.

FDM – Finite difference method (Método das diferenças finitas)

FEM – Finite element method (Método dos elementos finitos)

RDW – Riser Design Wizard (Assistente de projeto do sistema de alimentação)

GDW – Gating Design Wizard (Assistente de projeto do sistema alimentação)

Lista de figuras

Figura 2.1– Processo de moldação.	9
Figura 2.2 – Aplicação da tinta em (a) e queima de tinta na moldação em (b) com o objetivo de evaporar o solvente (álcool).....	9
Figura 2.3 – Fluxograma do processo normal de obtenção de peças vazadas em moldações em areia auto-secativa.	11
Figura 2.4 – Exemplo de um processo de obtenção de peças de fundição em moldações de areia auto-secativa	11
Figura 2.5– Solidificação em placas de aço, em (a) solidificação progressiva e em (b) solidificação direcionada	16
Figura 2.6 – Exemplo de pontos quentes.....	16
Figura 2.7 – Peça com alimentador para controlar os rechupes nas peças fundidas.	17
Figura 2.8 – Determinação das zonas quentes pelo método do círculo inscrito.....	18
Figura 2.9 – Expressões para o cálculo dos Módulos de arrefecimento de formas geométricas simples	19
Figura 2.10 – Distâncias da alimentação em placas de aço fundido em moldações de areia	24
Figura 2.11 – Critério da distância da alimentação desenhando um círculo a partir do centro do alimentador.	25
Figura 2.12 – Sistema de Gitagem	25
Figura 2.13 - Perfil do fluido metálico: (a) em queda livre; (b) dentro de um gito de paredes paralelas; (c) dentro de um gito cônico	29
Figura 2.14 – Técnicas comuns de estrangulamento do fluido	29
Figura 2.15 – Turbulência superficial em metais líquidos	31
Figura 2.16 – Diferentes bacias de vazamento: (a) cônica; (b) de fundo plano; (c) de fundo plano com eliminação da velocidade horizontal	33
Figura 2.17 – Dimensionamento do gito	35
Figura 2.18 – Comportamento do fluido de metal na ausência e presença de poço do gito de descida	36
Figura 2.19 – Estrutura do poço.	36
Figura 2.20 – Estrutura do canal de distribuição.	38
Figura 2.21 – Estrutura do ataque.....	39

Figura 2.22 – Locais de colocação de filtros em moldações com linha de separação horizontal, em (a) e (b) entre 90° e 0° da linha de separação e em (c) paralelo à linha de separação	40
Figura 2.23 – Locais de colocação de filtros em sistemas de gitagem vertical, em (a) colocação à saída da bacia de vazamento e em (b) colocação do filtro no canal de gitagem	40
Figura 3.1 - Representação de defeitos visível à superfície em (a) e depois de aberto (b).	46
Figura 3.2 – Lança de tração para reboques.	47
Figura 3.3 – Representação da formulação inicial, na análise do critério tempo de solidificação com t=8 min.	50
Figura 3.4 – Representação da formulação inicial, na análise do critério do tempo de fração crítica de sólido, t=3 min.	50
Figura 3.5 – Representação da formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.	51
Figura 3.6 – Representação da formulação inicial, na análise do critério gradiente da temperatura.	51
Figura 3.7 – Representação da formulação inicial, na análise do critério velocidade de arrefecimento.	52
Figura 3.8 – Representação da formulação inicial, na análise do critério de Niyama, com o valor de análise igual a 0 (zero),e com círculo vermelho a identificar as zonas de macroporosidade.....	53
Figura 3.9 – Representação da formulação inicial, na análise do critério FCC, identificando com um círculo vermelho as zonas de microporosidade.....	53
Figura 3.10 – Representação da formulação inicial, na análise da velocidade na base do gito.	55
Figura 3.11 – Representação vectorial da velocidade na base do gito, na formulação inicial.	55
Figura 3.12– Representação da formulação inicial, na análise do comportamento do fluido nos canais.	55
Figura 3.13 – Representação da formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.	56
Figura 3.14 – Representação vectorial da velocidade nos ataques, na formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.	56

Figura 3.15 – Representação da análise da velocidade do primeiro metal na peça, na formulação inicial.	57
Figura 3.16 – Representação dos vetores velocidade no ataque da peça à purga de escória, na formulação inicial. Vista de cima.	57
Figura 3.17 – Representação da temperatura na chegada do primeiro metal ao purgador de escória, na formulação inicial.	58
Figura 3.18 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise do critério gradiente da temperatura.	60
Figura 3.19 - Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise do critério velocidade de arrefecimento. ...	60
Figura 3.20 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise do critério FCC.	61
Figura 3.21 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise da velocidade na base do gito.	62
Figura 3.22 – Representação vectorial da velocidade na base do gito, na formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial.	62
Figura 3.23 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.	63
Figura 3.24 – Representação vectorial da velocidade nos ataques, na formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.	63
Figura 3.25 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise da velocidade do primeiro metal na peça. .	64
Figura 3.26 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise vectorial da velocidade no ataque da peça à purga de escória, vista de cima.	64
Figura 3.27 – Representação da temperatura na chegada do primeiro metal ao purgador de escória, no cacho com a temperatura de vazamento alterada.	65
Figura 3.28 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal na base do gito.	66
Figura 3.29 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal nos ataques.	67
Figura 3.30 – Gráfico do tempo que o metal demora a atingir os ataques em diferentes temperaturas.	67

Figura 3.31 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal a meio da peça.	67
Figura 3.32 - Gráfico do tempo que o metal demora a atingir o meio da peça em diferentes temperaturas.....	68
Figura 3.33 - Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal na ponta da peça.	68
Figura 3.34 - Gráfico do tempo que o metal demora a atingir a ponta da peça em diferentes temperaturas.....	68
Figura 3.35 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal na ponta da purga de escória.	69
Figura 3.36 – Gráfico do tempo que o metal demora a atingir a purga de escória em diferentes temperaturas.....	69
Figura 3.37 - Comportamento da velocidade, em diferentes temperaturas, ao longo da peça.....	70
Figura 3.38 – Representação da formulação com gitagem diferente da formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.....	71
Figura 3.39 – Representação da formulação com gitagem diferente da formulação inicial, na análise da velocidade onde o primeiro metal se encontra no centro das peças.	71
Figura 3.40 – Representação da formulação com gitagem diferente da formulação inicial, na análise dos vetorial da velocidade no centro das peças no ponto de encontro do metal.	72
Figura 3.41 – Representação da formulação com a área dos ataques duas vezes maior que na formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.	72
Figura 3.42– Análise do enchimento na formulação com a área dos ataques duas vezes maior que a formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.....	73
Figura 3.43 – Representação da análise dos vetores velocidade nos ataques, na formulação com a área dos ataques duas vezes maior que a formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.	73
Figura 3.44- Representação da formulação com a área dos ataques duas vezes menor que a formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.	74

Figura 3.45 – Representação da análise vectorial da velocidade nos ataques, na formulação com a área dos ataques duas vezes menor que na formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.	74
Figura 3.46– Representação da formulação com o parâmetro tempo de enchimento superior à formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.	75
Figura 3.47– Representação da formulação com o parâmetro tempo de enchimento superior em relação à formulação inicial, na análise do critério de Niyama, com valor de análise igual a 0 (zero).	76
Figura 3.48– Representação da análise vectorial da velocidade nos ataques, na formulação com o parâmetro tempo de enchimento superior à formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.	76
Figura 3.49 – Representação da análise vectorial da velocidade nos ataques, na formulação com o parâmetro tempo de enchimento inferior à formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.	77
Figura A1.1– Modelo 3D do fundido com furo tapado.	86
Figura A1.2 – Visualização dos resultados da simulação de solidificação do fundido com nova estrutura no RDW.	87
Figura A1.3 – Raio de ação do alimentador.	88
Figura A2.1 – Esquematização do alimentador e camisas utilizadas.	89
Figura A3.1 – Cacho da peça utilizado no caso prático.	90
Figura A3.2 – Representação das dimensões do gito, no caso prático.	91
Figura A3.3 – Estrutura do canal de distribuição.	94
Figura A3.4 – Estrutura do ataque.	95
Figura A4.1 – Representação da velocidade (imagem esquerda) e da temperatura (imagem direita) do fluido durante o enchimento.	97

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Valores de alguns ângulos de saídas frequentes	12
Tabela 2.2 – Valores de contração de alguns metais usados em fundição.	13
Tabela 2.3 – Sobre-espessuras para maquinagem	13
Tabela 2.4 – Valores de coeficientes de segurança k segundo Gabel.	22
Tabela 2.5 - Valores do coeficiente C segundo Gabel	22
Tabela 2.6 – Propriedades dos materiais no estado líquido	35
Tabela A1.1– Dados utilizados para o cálculo do volume do alimentador pelo critério do volume.	87
Tabela A1.2– Características da camisa exotérmica.	88
Tabela A2.1 Tabela do fornecedor com as relações geométricas e módulos dos alimentadores produzidos.	89
Tabela A3.1 – Dados referentes ao fundido.	90
Tabela A3.2 – Relação do sistema pressurizado.	93

Capítulo 1

1. Introdução

A fundição é um dos processos de fabrico mais antigos, tendo sido encontrados objetos de Cobre, Ouro, Prata datados de 7000 a 3000 AC [1]. Contudo, só nas últimas quatro décadas a solidificação dos metais e suas ligas começaram a ser investigados com critérios e metodologias científicas [2, 3, 4 e 5]. Atualmente a indústria de fundição é um importante setor na economia mundial, fornecendo produtos para diferentes indústrias e que vão desde a automóvel [6] à ourivesaria [7], passando por vários setores ligados à metalomecânica [8]. Existem várias técnicas de fundição [9], tais como a fundição em areia [10], injetada [11], por cera perdida [12], em coquilha [9], entre outras. Todavia, este trabalho foi desenvolvido numa empresa de fundição (FAL – Fundição do Alto da Lixa, S.A.) que utiliza essencialmente a técnica de fundição em areia. Nesse sentido, o estudo aqui apresentado centra-se nessa técnica.

A técnica de fundição em areia é muito antiga e pouco automatizada, sendo muitos dos seus conhecimentos baseados na experiência dos seus utilizadores sendo, por isso, muito empíricos [13]. Nesse sentido, há a necessidade de implementar alguns estudos, utilizando metodologias científicas para resolver problemas que surgem nestas indústrias. Nos últimos anos têm sido realizados vários estudos científicos [14, 15 e 16] para resolver alguns dos problemas que ocorrem na tecnologia de fundição em areia e que, muitas vezes, estão associados há necessidade de fundir novas ligas [17 e 18], cujo processo de solidificação é muito distinto dos materiais mais tradicionais utilizados neste processo de fabrico. Na atualidade, as abordagens científicas mais comuns para se estudar o comportamento dos materiais durante o vazamento e solidificação são de dois tipos: experimentais [19] e numéricos [20]. Na abordagem experimental há necessidade de recorrer a equipamentos e laboratórios com elevados custos, que permitem determinar as propriedades mecânicas dos fundidos [21], tais como, a sua rigidez, tensão de cedência, tensão limite de fadiga, dureza, etc., bem como, defeitos de fundição como os rechupes, bolhas devido à excessiva libertação gasoso, areia solta, entre outros [1]. As propriedades mecânicas são determinadas a partir dos ensaios mecânicos convencionais, como por exemplo, ensaios de tração [22], de fadiga [23] e dureza [24], sendo na sua maioria ensaios destrutivos. Os defeitos de fabrico podem ser

detetados por técnicas não destrutivas como é o caso de raios X [25], ultrassons [26] ou destrutivas como o seccionamento das peças fundidas e micrografia [27]. A utilização de simulações numéricas recorrendo a técnicas de elementos finitos e diferenças finitas têm vindo a crescer nos últimos anos, devido, essencialmente, à melhoria dos algoritmos e da capacidade de cálculo dos computadores. As simulações têm algumas vantagens comparativamente com as técnicas experimentais, sendo as mais evidentes, o menor custo e a possibilidade de prever comportamentos antes do fabrico das peças fundidas. Contudo, nos processos mais complexos a sua aproximação pode ficar longe dos resultados reais que só podem ser mensuráveis recorrendo a técnicas experimentais.

O trabalho descrito neste relatório teve por base a necessidade de solucionar um problema que surgiu na FAL que consistia no aparecimento de alguns defeitos do tipo rechupe que surgia esporadicamente em algumas peças fundidas, sem que houvesse qualquer alteração dos parâmetros de fundição no processo de fabrico. Para o efeito, implementaram-se simulações numéricas utilizando os programas numéricos existentes na empresa, *FlowCast®* e *SolidCast®*, alterando alguns parâmetros de fundição com o objetivo de verificar quais os mais influentes no aparecimento do rechupe nas peças fundidas. Após a determinação desse parâmetro, procederam-se às alterações necessárias para minimizar a ocorrência desse tipo de defeito nas peças fabricadas.

1.1. Enquadramento do trabalho

Este trabalho enquadra-se num estágio em empresa onde se pretende desenvolver o estudo de problemas novos e a aplicação de métodos e instrumentos para a sua resolução. Nesse sentido, o Instituto Politécnico de Bragança (IPB) criou um protocolo com a Fundição do Alto da Lixa, S.A. (FAL), no sentido de promover este estágio, que teve como principal objetivo o desenvolvimento e aprofundamento da utilização de ferramentas numéricas para a resolução de alguns processos de fabrico.

De acordo com o plano de trabalho, este estágio iniciou-se no IPB onde decorreram duas fases importantes, uma pesquisa bibliográfica exaustiva do estado da arte sobre a utilização de ferramentas numéricas na simulação do processo de fabrico de fundição e o estudo e utilização aprofundadas dos programas de simulação numérica existentes na FAL. No segundo semestre do presente ano letivo, o trabalho decorreu nas instalações da FAL, em que, durante esse período foram analisados vários casos de estudo, sendo

utilizadas ferramentas numéricas para resolver alguns problemas de fabrico, nomeadamente, a previsão da ocorrência de alguns defeitos do tipo macrorechupe. Neste relatório é apresentado apenas um dos casos em estudo, em que foi possível determinar a causa e resolução de um defeito de fabrico de uma peça produzida na FAL.

1.2. Apresentação da empresa FAL-FUNDIÇÃO DO ALTO DA LIXA, S.A.

A empresa FAL – Fundição do Alto da Lixa, S.A. foi fundada em 14 de Outubro de 1977, então com a denominação de Neves & Leonel, Lda.

Tinha como atividades principais o fabrico de componentes, reparação de máquinas agrícolas e de terraplanagem. A evolução da empresa conduziu ao crescimento da atividade de fundição.

Deste modo, o ano de 1993 constituiu o ponto de viragem, o que levou à redenominação da mesma para Fundição do Alto da Lixa, S.A., ao ter sido realizado um investimento na área de fundição que a capacitou para o fabrico de uma vasta gama de produtos em aço e ferro fundido, proporcionando a entrada em novos mercados [28].

A FAL é uma fundição de renome no mercado nacional e internacional, apostando num mercado indireto, África do sul, Arábia Saudita, Argélia, Austrália, Camarões, Canadá, China, Coreia do Sul, EUA, Índia, Nigéria, Reino Unido e Turquia, e num mercado direto, Portugal, Alemanha, Áustria, Bélgica, Espanha, Finlândia, França, Holanda, Itália, República Checa, Suécia e Suíça. A capacidade de produção ronda as 2500 toneladas anuais de produto acabado.

O processo tecnológico implementado é o processo de fundição por gravidade em areia auto-secativa.

No processo produtivo a empresa reconhece a importância da tecnologia na redução dos prazos de entrega e de custos de produção, e por isso recorre a *software* de CAD, *SOLIDWorks*, e de simulação numérica da solidificação e enchimento, *SOLIDCast* e *FLOWCast*.

O fabrico de moldes na FAL é realizado por processos tradicionais, como maquinagem convencional e fabrico manual, e modernos como a prototipagem rápida e CNC (*Computer Numerical Control*).

No processo de moldação, a areia auto-secativa é misturada com resina e catalisadores, o acabamento superficial das peças não é negligenciado, optando-se por manter a areia sempre com um bom nível de qualidade, evitando a necessidade de adicionar areia de contacto. A refratariedade da moldação é melhorada com o recurso a revestimento de tinta de zircónia em base de álcool isopropílico. Na FAL este sector opera em três linhas distintas possuindo um misturador contínuo em cada linha de diferentes capacidades, implicando assim uma divisão das linhas de acordo com as dimensões das moldações. Numa primeira linha, para moldações de pequena dimensão, utiliza um misturador contínuo de 10 ton/h, uma segunda linha para moldações de médias dimensões com misturador contínuo de 15 ton/h e por fim, uma terceira linha para moldações de grandes dimensões com um misturador contínuo de 30 ton/h. Na macharia dispõe de uma máquina disparadora de machos de 15L para o processo de caixa fria.

A fusão é assegurada por quatro fornos de indução, um de 1500 Kg, dois de 500 Kg e um de 250 Kg de capacidade nominal. O laboratório está equipado com dois espectrómetros, um com base Fe e Ni e o outro com base Fe e Cu.

No sector de acabamentos, a FAL está equipada com duas granalhadoras, uma das quais vocacionada em exclusividade para peças em aço inox, rebarbadoras de alta frequência, cabines insonorizadas e sistema de aspiração de poeiras. Na soldadura detém pessoas certificadas para vários materiais.

No sector de tratamentos térmicos, está equipada com dois fornos a gás, um de 8m³ e um de 4m³. Ambos têm possibilidade de arrefecimento em tanques de imersão de 8m³ e 15m³ de água ou polímero, sendo possível a realização dos seguintes tratamentos, hípertêmpera, têmpera, revenido, alívio de tensões, normalização e homogeneização.

No sector de controlo de qualidade, a FAL está preparada para garantir a qualidade dos seus produtos. Para isso dispõe de meios necessários e de pessoas qualificadas e competentes para a realização de ensaios e controlo dimensional. Os ensaios que dispõe são, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ensaio por ultra-sons, ensaio de tração,

ensaio de choque, ensaio metalográfico, ensaio radiográfico e ensaio de dureza [29]. Para o controlo dimensional dispõe de um braço de medição tridimensional, *FARO*[®].

1.3. Motivações

A principal motivação deste trabalho prende-se com a utilização de ferramentas numéricas que permitam prever, com elevada acuidade, a ocorrência de defeitos em peças fabricadas por fundição, que de outro modo seria impossível prever. Associada a esta motivação, pretende-se, também, implementar simulações numéricas utilizando vários parâmetros de fundição com o intuito de escolher o mais adequado para evitar que surjam os referidos defeitos de fabrico.

A grande vantagem das ferramentas numéricas é a de permitir realizar simulações e prever comportamentos do material antes do fabrico, minimizando ou evitando a necessidade de pré-séries, antes do fabrico final das peças.

A motivação pessoal do autor deste trabalho foi a de aprofundar os seus conhecimentos no processo de fabrico de fundição e nas ferramentas numéricas associadas ao processo. Uma outra motivação importante foi a oportunidade do contacto com uma empresa real e a experiência adquirida no estudo e resolução de problemas ligados a este tipo de indústria.

1.4. Objectivos e estrutura da dissertação

O principal objetivo desta dissertação consiste em verificar a capacidade de um programa de simulação numérica na previsão do aparecimento de eventuais defeitos em peças fabricadas por fundição. Este objetivo foi consubstanciado com um caso de estudo real ocorrido na empresa e onde ficou demonstrado a potencialidade dos programas de simulação numérica, *SOLIDCast* e *FLOWCast*, na previsão de defeitos em fundidos.

Na apresentação da dissertação, após a presente introdução, segue-se o capítulo 2, fundamentos teóricos, que são muito importantes para auxiliar a seguir nas várias experiências.

Numa parte inicial do capítulo 2, é definido o conceito de fundição referindo as vantagens e desvantagens do mesmo. Após esta definição, é caracterizado os métodos

de solidificação, assim como um exemplo prático referente ao mesmo. Posteriormente, são abordados todos os passos necessários para a determinação de um sistema de alimentação, assim como um sistema de gitagem. Após a abordagem anterior, foi descrito o método de fundição utilizado na empresa em questão, e todos os processos a que uma peça está sujeita desde o projeto até ao acabamento.

No Capítulo 3, são descritos todos os passos e resultados, referentes à análise das simulações nos programas de simulação numérica, efectuados na abordagem do estudo ao problema em questão.

Por fim, segue-se a conclusão.

Capítulo 2

2. Fundamentos teóricos

2.1. Tecnologia da fundição

A tecnologia de fundição é composta por métodos, processos e técnicas para conformação de metais, e para a solidificação controlada.

O objetivo fundamental da fundição é o de dar forma geométrica adequada ao metal, vertendo-o no estado líquido para dentro de uma cavidade (conjunto de elementos em materiais apropriados que definem o modelo ou molde) para após solidificação se obter a peça moldada.

O objetivo deste processo tecnológico é pois o de obter peças com propriedades determinadas e com a forma, dimensões, acabamento e tolerâncias definidas na fase de projeto. Quando a qualidade superficial ou as propriedades intrínsecas das peças vazadas não são suficientes para corresponder às solicitações do projecto, é por vezes necessário proceder a operações de "acabamento" ou de "tratamento térmico" posterior, conforme os casos [1].

Existem vários tipos de processos de fundição:

- Fundição em moldações de areia
 - Moldação em areia verde (húmida)
 - Moldação em areia auto-secativa (areia de machos e outras)
 - Moldação em carapaça
 - Moldação em areia aglomerada em cimento
- Fundição em moldações metálicas ou permanentes
 - Moldação em coquilha
 - Moldação para fundição injetada
 - Moldação para centrifugação
- Fundição em moldações de gesso
- Fundição em moldações em carapaça cerâmica, por cera perdida
- Fundição em moldações-bloco, em materiais cerâmicos

- Fundição em moldações por processos especiais (em grafite, em materiais cerâmicos, etc.) [30].

O processo mais adequado para a produção de uma peça fundida depende das suas dimensões, da complexidade geométrica, do tipo e qualidade do metal. O método aqui destacado é o método de fundição por gravidade em moldações de areia, mais precisamente em moldações de areia auto-secativa.

2.2. Processo de fundição em areia auto-secativa

A moldação é cavidade com a forma próxima da peça final e que será preenchida com o metal líquido vazado para o seu interior. Esta cavidade é realizada no interior de um material refratário e que no caso, em análise, é a areia de sílica. Para obter-se uma estrutura sólida a partir de grãos de areia soltos é necessário utilizar um ligante ou aglomerante que agregue os grãos de areia e os torne numa estrutura compacta e mecanicamente resistente. No estudo efetuado foi utilizado um aglomerante polimérico termorendurecível de resinas furânicas. A resina é usada em quantidades máximas de 2% da massa de areia e é endurecida por polimerização de condensação, catalisada por um ácido onde a sua quantidade ronda os 20 e 50% da massa de resina. A moldação descrita neste parágrafo tem a designação de moldação de areia auto-secativa.

As resinas furânicas são usadas como ligantes da areia nos processos de fundição, têm como principais vantagens o aumento da velocidade de endurecimento e resistência das moldações, antes do vazamento e aumento da colapsibilidade após vazamento. A utilização deste ligante melhora a qualidade da peça metálica produzida, bem como, o aumento de produtividade (grande redução nos tempos de cura relativamente aos ligantes inorgânicos, possibilita a automatização de certos sistemas) [31].

Uma moldação é, normalmente, constituída por duas meias moldações, superior e inferior. Para obter a moldação, coloca-se um caixilho em cima de uma placa molde e sobre a qual se encontra o meio molde, posicionado por meio de pinos-guia a ela rigidamente ligados. Lança-se a areia para dentro do caixilho pelo lado oposto à placa molde e calca-se. Depois de bem calcada a areia, tira-se o molde da moldação, tendo o cuidado de não a estragar durante esta operação, chamada desmoldação. Para facilitar a desmoldação o molde tem geralmente uma pequena inclinação no sentido de desmoldação, chamada saída. Essa inclinação normalmente é de 1° a 2°.

O molde é uma ferramenta com formas correspondentes às das cavidades pretendidas, que permitem a impressão fácil e rápida, na areia de moldação, da forma fêmea da peça. São geralmente de madeira, de araldite ou metálicos, conforme as séries de peças fundidas que se pretendem fabricar podendo ser menores ou maiores [22].



Figura 2.1– Processo de moldação.

Para finalizar este processo, a moldação é revestida por uma tinta refratária na cavidade originada pelo molde. A principal função da tinta é a criação de uma camada intermediária entre areia e metal, visando conferir um bom acabamento ao molde ou macho e, por conseguinte, à peça. A tinta é constituída de uma substância refratária (grafite ou zircónio), uma substância aglomerante, como por exemplo, bentonite e um solvente (água ou álcool) [23]. A pintura pode ser feita por pincel, pistola ou imersão, sendo imprescindível que a camada aplicada seja fina e que o solvente seja totalmente evaporado por ocasião da queima da tinta como se pode observar na Figura 2.2, evitando que a tinta seja mais uma fonte de defeito na peça fundida. Concluindo esta etapa a moldação está pronta a ser vazada.



Figura 2.2 – Aplicação da tinta em (a) e queima de tinta na moldação em (b) com o objetivo de evaporar o solvente (álcool).

2.3. Processo de produção de peças fundidas

Etapas do processo tecnológico de fundição de um fundido em moldação em areia:

- 1º – Desenho geométrico da peça de fundição e projeto das ferramentas (moldes, caixas de machos, etc.).
- 2º - Cálculo e dimensionamento dos sistemas de alimentação e de gitagem.
- 3º – Construção dos moldes e respectivas caixas de machos (caso existam).
- 4º – Fabricação das moldações e, se necessário, os machos que permitem reproduzir as formas internas das moldações.
- 5º – Fusão da carga metálica que dará origem à liga a ser vazada.
- 6º – Vazamento do metal líquido nas cavidades da moldação.
- 7º – Desmoldação da peça.
- 8º – Corte de alimentação e respetiva gitagem e rebarbas.
- 9º – Tratamentos térmicos (opcional).
- 10º – Acabamentos.
- 11º – Inspeção final e controlo da qualidade.
- 12º – Processos especiais como maquinagem ou pintura (opcional).

Na Figura 2.3, apresenta-se um fluxograma da sequência das etapas necessárias para a obtenção de peças por fundição [1].

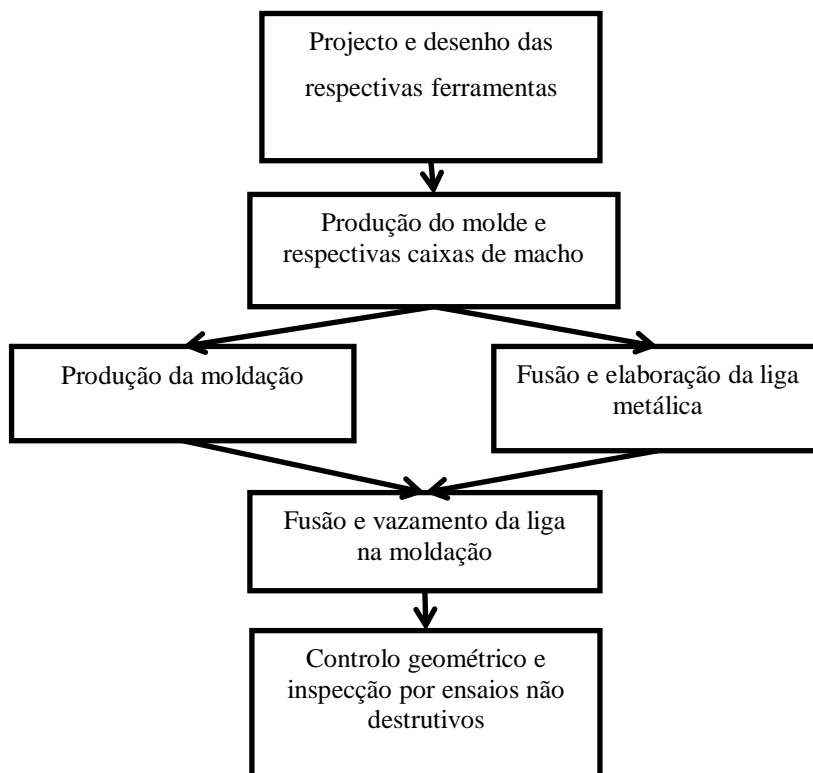


Figura 2.3 – Fluxograma do processo normal de obtenção de peças vazadas em moldações em areia auto-secativa.

Na Figura 2.4 encontra-se esquematicamente representado o processo de fabrico de uma peça de fundição. Pode observar-se todos os passos do fabrico referidos nos parágrafos anteriores.

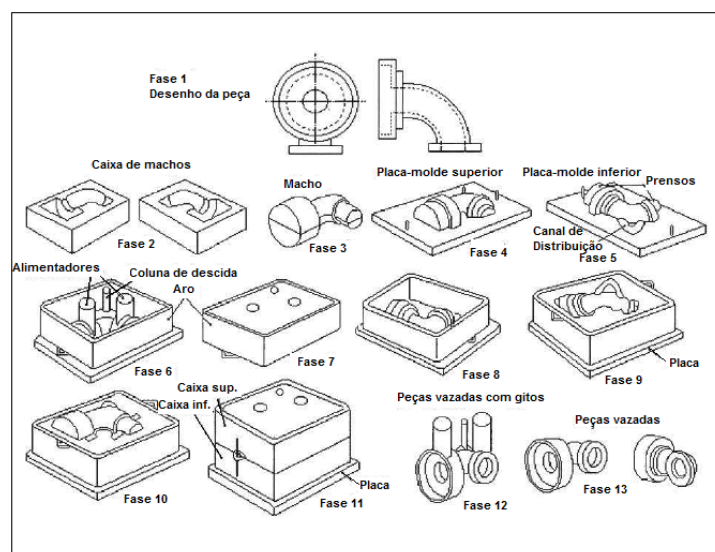


Figura 2.4 – Exemplo de um processo de obtenção de peças de fundição em moldações de areia auto-secativa [1].

2.3.1. Construção do molde

O molde tem em geral a forma da peça com uma escala geométrica superior para compensar a contração metálica e deve ter sobre-espessuras nas zonas de maquinagem. Para se obterem, moldações e machos, com uma precisão de forma constante ao longo do processo, é essencial que nas superfícies dos moldes e das caixas de macho, que lhes dão origem, sejam empregues materiais com maior durabilidade. Estas ferramentas devem ser periodicamente inspecionados para verificação de danos físicos [1].

Outros aspectos importantes no projeto dos moldes são a escolha da apartação do molde, a utilização de machos, as saídas nos moldes, as sobre-espessuras devido à contração, sobre espessuras de maquinagem e outros fatores.

Normalmente, o molde é apartado e aplicado em placas com o objectivo de facilitar a moldação, para isso, ele é cortado por uma, ou por mais do que uma, superfície plana ficando portanto dividido em duas ou mais partes.

Os machos são utilizados para fazer certas formas interiores e ou exteriores incapazes de serem feitas por escavação directa a partir do molde. Nas zonas onde são aplicados os machos, o molde, em vez de ter a forma da peça, tem prensos, onde vão apoiar os machos.

Para tornar possível e facilitar a retirada do molde da moldação de areia, é geralmente necessário dar ao molde pequenas inclinações chamadas saídas. Caso contrário o molde dificilmente sai da moldação e poderá até degradar a mesma na sua retirada.

As saídas têm valores variáveis conforme as dimensões, tipo de peças e os inconvenientes que possam surgir. Na Tabela 2.1, faz-se a classificação e síntese das diferentes inclinações usadas para as saídas.

Tabela 2.1 - Valores de alguns ângulos de saídas frequentes [21].

Tipo de modelo	Saída %	Ângulo Correspondente	Utilização
Modelo chamado Sem saída	0,2	0° 6' 53"	Excepcional: Fustes, colunas, gitos de 2m e mais
	0,5	0° 17' 11"	Modelos metálicos, nas paredes altas da peça
Com pequena saída ou saída mínima	1	0° 34' 23"	
Com saída normal	2	1° 8' 45"	
Com saída acentuada	5	2° 31' 44"	Zonas cavadas nas placas moldes (correspondentes a saliências na moldação)

Na solidificação das peças fundidas, acontece um fenômeno de contração do material durante o arrefecimento, desde a temperatura de solidificação até à temperatura ambiente, portanto, a peça fria tem geralmente menores dimensões do que o molde que lhe deu origem.

Para obtermos uma dada dimensão numa peça fundida, no molde, tem que ser ligeiramente superior do que a peça a obter. A dimensão superior atribuída ao molde para compensar a contração depende do material a utilizar na produção do fundido. Na Tabela 2.2 apresentam-se as contrações referentes a alguns dos materiais mais usados em fundição.

Tabela 2.2 – Valores de contração de alguns metais usados em fundição.

Metal	% linear
aço	2,0
ferro fundido	0,5-1,0
ferro nodular	0,8
alumínio	1,7
latão	1,3-1,6
zinco	2,6

As partes das peças fundidas que têm que ficar com formas e dimensões mais precisas são obtidas por maquinagem.

Como as tolerâncias possíveis para o processo de fabrico por fundição são muito elevadas, em regiões da peça em que há necessidade de tolerâncias mais apertadas, é dada uma sobre-espessura para efetuar essa operação. Neste caso, os moldes que dão origem a essas peças têm uma sobre-espessura de maquinagem.

As sobre-espessuras que são necessárias dar ao molde dependem das dimensões da peça e da sua forma. Na Tabela 2.3 estão apresentados alguns exemplos de sobre-espessuras para casos corrente.

Tabela 2.3 – Sobre-espessuras para maquinagem [22].

Espessura aproximada da peça (mm)	Acréscimo médio na superfície do modelo (mm)		
	Aço	ferro fundido	não-ferrosos
até 150	3,2	2,4	1,6
de 150 a 300	4,8	3,2	1,6
de 300 a 500	6,4	4,0	2,4
de 500 a 900	6,4	4,8	3,2
de 900 a 1500	6,4	4,8	3,2

No processo de fundição, a moldação e os machos exercem constrangimentos à contração metálica, durante a solidificação e arrefecimento, provocando o aparecimento

de tensões residuais que podem originar deformações nas peças fundidas. A combinação destes múltiplos fatores contribui negativamente para a previsão da precisão dimensional final das peças obtidas por fundição [1].

2.4. Solidificação de ligas metálicas

A solidificação de um metal quando vazado na respetiva cavidade da moldação é uma fase importante no processo de fundição influenciando muito a qualidade e o rendimento do produto.

A solidificação de peças fundidas é um fenómeno não-linear e transitório, que representa um desafio em termos de modelação e análise. Trata-se de uma mudança de fase com libertação de calor latente numa interface líquido/sólido que avança à medida que a solidificação progride. O calor é transferido a partir do metal fundido para o ambiente de acordo com três modos de transferência de calor, condução, convecção e radiação.

As propriedades físicas e térmicas do metal refratário, durante a solidificação variam de modo não linear na gama de temperaturas a que o processo ocorre. Para uma boa análise da transferência de calor é necessário o conhecimento dessas mesmas propriedades do metal.

Existem outros fatores que intervêm de modo a concederem maior variabilidade ao processo, sendo os parâmetros de vazamento (tempo e temperatura), o sistema de gitagem, a presença de arrefecedores ou machos e a complexidade da geometria do fundido.

O processo de solidificação tem início junto às paredes da moldação, locais mais frios, progredindo para o centro. Assim, secções de menor espessura solidificam mais rápido.

A mudança do estado líquido para o estado sólido é acompanhada por uma contração do volume, que deve ser compensada por um sistema de alimentação de modo a evitar cavidades e poros originados pela respetiva contração do volume. As zonas com maior probabilidade deste tipo de defeitos, são as zonas que solidificam em último lugar, normalmente designados por pontos quentes. Os defeitos de contração, geralmente, estão localizados no interior das peças com uma enorme concentração de porosidade. A este defeito dá-se o nome de rechupe.

A determinação da ordem de solidificação relativa no interior do fundido é vital para prever a sua sanidade.

O processo de solidificação ocorre em duas etapas denominadas de nucleação e crescimento. Inicialmente forma-se um pequeno núcleo sólido, no seio do líquido, que posteriormente cresce. Isto sucede com vários núcleos simultaneamente até que todo o material seja um sólido. [24]

2.4.1. Solidificação progressiva vs. direcionada

Geralmente, a solidificação tem início junto às paredes da moldação, onde a área disponível para a transferência de calor é maior. Se as frentes de solidificação convergirem das zonas mais finas para o centro térmico do fundido, está-se perante uma solidificação progressiva. Se as paredes paralelas de sólido se encontrarem no centro geométrico do fundido, o último metal a solidificar encontra-se isolado, isto é, completamente rodeado de sólido. Então, a contração durante a solidificação deste último líquido irá dar origem a uma cavidade ou porosidade acentuada.

De modo a evitar a formação de rechupes no fundido, promove-se uma solidificação direcionada, das zonas mais finas ou mais extremas, para as zonas mais maciças e destas para o interior de alimentadores, que, pela sua massividade, solidificam mais tardiamente. Os alimentadores constituem apêndices ao fundido, que funcionam como reservatórios de metal líquido para compensar a contração. Para que os alimentadores sejam efetivos é necessário que:

- O ponto quente do conjunto se encontre no interior do alimentador;
- Exista um caminho de alimentação que forneça metal líquido à frente de solidificação;
- O volume do alimentador seja suficiente para compensar a contração do fundido e do próprio alimentador;
- Raio de ação cubra a zona do ponto quente.

Os dois tipos de solidificação irão ocorrer em simultâneo. A chave para produzir fundidos consiste em projetar o sistema de alimentação (número, posição, volume e geometria dos alimentadores) de modo a que prevaleça a solidificação direcionada [25].

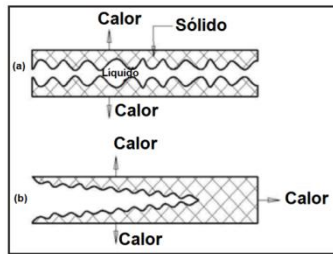


Figura 2.5– Solidificação em placas de aço, em (a) solidificação progressiva e em (b) solidificação direcionada [25].

Os pontos quentes são zonas do fundido onde a solidificação é mais lenta, podendo resultar em graves defeitos de contração. Geralmente, estes são formados nas zonas de maior massa e na junção de vários tipos de secções, por exemplo, a junção de secções em “Y”, secções em “T” e pela adição de nervuras e saliências no fundido, tornando-se difícil de alimentar e aumentando a probabilidade de defeitos, como podemos ver na Figura 2.6 exhibe um exemplo de pontos quentes.

A melhor forma de reduzir os pontos quentes passa por eliminar ou simplificar as secções propícias aos pontos quentes, direcionando a solidificação de dois ou mais pontos por um único acesso. O objetivo é projetar a solidificação direcional ao longo de caminhos de solidificação sempre que possível, minimizando assim o número de alimentadores necessários [25].

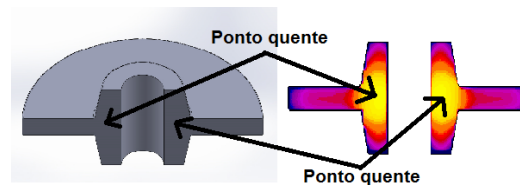


Figura 2.6 – Exemplo de pontos quentes.

2.4.2. Contração do volume

Os metais ao solidificarem sofrem uma contração. Na realidade, do estado líquido ao estado sólido, são verificadas três fases de contração.

- Contração líquida – corresponde a uma diminuição da temperatura até ao início da solidificação;
- Contração de solidificação – corresponde à variação do volume que ocorre durante a mudança do estado líquido para o estado sólido;

- Contração sólida – corresponde à variação de volume que ocorre já no estado sólido, desde a temperatura do fim de solidificação até à temperatura ambiente.

A contração varia de acordo com a liga considerada e é expressa em percentagem de volume. No caso da contração sólida, entretanto, a mesma é expressa linearmente, pois torna-se mais fácil projetar os moldes [26].

A contração dá origem a uma heterogeneidade conhecida por vazio ou rechupe, como mostra a Figura 2.7, a parte superior do alimentador.



Figura 2.7 – Peça com alimentador para controlar os rechupes nas peças fundidas.

2.4.3. Métodos de análise da solidificação

Existem dois tipos de abordagem à análise da solidificação, métodos geométricos e métodos numéricos.

A abordagem da análise da solidificação tem como objetivo a determinação da ordem relativa de solidificação, isto é, identificar pontos quentes e caminhos de alimentação.

2.4.3.1. Métodos geométricos

A utilização dos métodos geométricos assume que a sequência de solidificação é função da geometria do fundido.

O método geométrico é o mais simples para a localização de um ponto quente e consiste em traçar círculos inscritos em secções transversais do fundido. O ponto quente encontra-se na zona de maior concentração de massa, identificada pelo círculo de maior diâmetro como mostra a Figura 2.8.

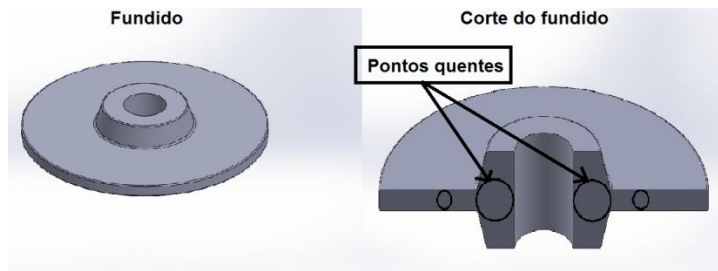


Figura 2.8 – Determinação das zonas quentes pelo método do círculo inscrito.

Existe outros métodos que é baseado numa equação expressa por *Nicolas Chvorinov* [24] que relaciona o tempo de solidificação de um fundido com o seu próprio módulo de arrefecimento, sendo o módulo de arrefecimento, o quociente entre o volume do fundido (V) e a área através do qual ocorre a transferência de calor (A) [24].

$$K \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2.1)$$

Onde,

K – constante que depende das propriedades do metal e da moldação.

Se a peça tiver uma forma complexa, o cálculo do módulo pode tornar-se extremamente trabalhoso. Neste caso, assemelha-se a peça ou elementos desta, a formas de sólidos geométricos mais simples, placa, barra, cubo, cilindro, etc., calculando-se o respetivo módulo. Na Figura 2.9 indicam as fórmulas para o cálculo dos módulos de algumas dessas fórmulas.

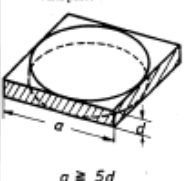
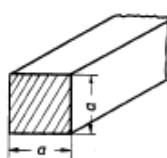
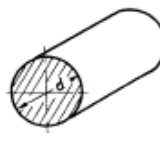
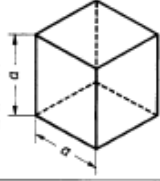
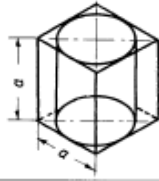
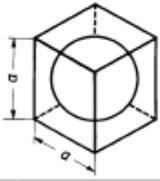
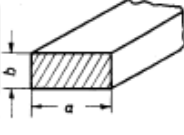
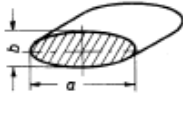
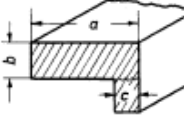
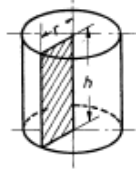
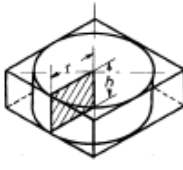
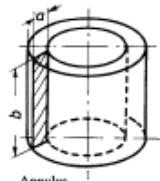
 <p>$a \geq 5d$</p> <p>$M = \frac{a}{2}$</p>	 <p>$M = \frac{a}{4}$</p>	 <p>$M = \frac{d}{4}$</p>
 <p>$M = \frac{a}{6}$</p>	 <p>$M = \frac{a}{6}$</p>	 <p>$M = \frac{a}{6}$</p>
 <p>$M = \frac{a \cdot b}{2(a+b)}$</p>	 <p>$M = \frac{a \cdot b}{2(a+b)}$</p>	 <p>$M = \frac{a \cdot b}{2(a+b)-c}$</p>
 <p>$M = \frac{r \cdot h}{2(r+h)}$</p>	 <p>$M = \frac{r \cdot h}{2(r+h)}$</p>	 <p>Annulus</p> <p>$M = \frac{a \cdot b}{2(a+b)}$</p>

Figura 2.9 – Expressões para o cálculo dos Módulos de arrefecimento de formas geométricas simples [27].

Muitas vezes os vários elementos considerados encontram-se ligados a outros elementos da peça, e a respetiva superfície de contacto não desempenha uma função arrefecedora. O módulo calcular-se-á, então, a partir do volume e da superfície através da qual se dá a evacuação de calor, superfície de contacto do elemento com a moldação. Quando o elemento principal se encontra ligado a outros elementos de dimensões relativamente reduzidas calcula-se o módulo do elemento principal como se este se encontrasse isolado do resto da peça, multiplicando o valor obtido por um fator dependente do tipo dos elementos ligados [1].

2.4.3.2. Métodos numéricos

Na utilização de métodos numéricos para a simulação de solidificação, a geometria do fundido é dividido numa série de elementos simples, sendo aplicada uma equação de condução de calor ao longo de intervalos de tempo, a fim de, obter as temperaturas nos

diferentes nós do fundido. O elevado número de nós e os fenómenos de transferência de calor em cada nó, obriga à utilização de um computador para realizar os cálculos.

O método das diferenças finitas (*FDM*) e o método dos elementos finitos (*FEM*), constituem os métodos de aproximação mais comuns na maioria dos programas de simulação de solidificação, sendo mais comum o método de elementos finitos (*FEM*), pois permite obter resultados realistas, com elevada resolução e acuidade mas, geralmente, à custa de um elevado esforço de computação. Contudo, para algumas aplicações o método das diferenças finitas (*FDM*) é mais adequado para simular o fenómeno em análise.

Basicamente, as etapas típicas para a execução de uma simulação consistem em:

- Modelação do sólido na própria plataforma do programa de simulação ou, para geometrias mais complexas, recorrer a um *software CAD*;
- Geração da malha, formada em *FDM* por elementos geométricos como cubos, e em *FEM* por elementos como triângulos e retângulos;
- Seleção do material e definição de uma base de dados com as propriedades térmicas e físicas;
- Especificação de condições fronteira como coeficientes de transferência de calor com moldação, ar e arrefecedores;
- Processamento dos inputs;
- Pós-processamento para visualizar os resultados (como tempo de solidificação e porosidade), normalmente apresentados sob a forma de um conjunto de gráficos com códigos de cores [24].

2.5. Sistema de alimentação

Os alimentadores tornam-se imprescindíveis na solidificação de um fundido de modo a colmatar a necessidade de metal nas zonas cuja solidificação é mais tardia, zonas de maior módulo, impedindo o aparecimento de rechupes resultantes da solidificação da liga.

Todos os pontos quentes devem ser alimentados de uma forma eficaz, para isso, os alimentadores tem de estar bem localizados para o fundido ficar livre de defeitos. Se existe apenas um grande ponto quente no fundido, o alimentador deve ser localizado na face mais próxima do ponto quente, se houver mais do que um ponto quente e estes se

encontrarem isolados uns dos outros, vai ser necessário usar mais do que um alimentador no fundido, de acordo com o número de pontos quentes existentes. Quando os pontos quentes apresentam diferentes tempos de solidificação, a localização e o número dos alimentadores devem ser analisados de modo a compensar todos os pontos quentes e devem ser apenas os necessários e suficientes para o efeito. Para pontos quentes menores podem ser utilizados arrefecedores em vez de alimentadores.

Os alimentadores podem ser classificados como alimentadores de topo ou laterais, os de topo são colocados em cima de um ponto quente e os laterais são colocados ao lado do ponto quente daí os seus nomes. Os alimentadores mais eficazes são os de topo por causa do efeito adicional da gravidade.

Os alimentadores também podem ser classificados como atmosféricos ou cegos, os alimentadores atmosféricos possuem os seus topos expostos à atmosfera mostrando o metal líquido aumentando à medida que o molde é cheio, enquanto os alimentadores cegos encontram-se no interior da moldação, logo em moldações de areia, os alimentadores atmosféricos arrefecem mais rapidamente do que os alimentadores cegos.

Um bom sistema de alimentação deverá ainda apresentar o menor volume compatível com o cumprimento das suas funções e ser fácil de remover [28].

2.5.1. Módulo de arrefecimento dos alimentadores

O módulo de arrefecimento consiste em criar condições para uma solidificação direcionada. Na solidificação do conjunto (fundido e alimentadores) deve ser assegurado 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, como tal, no cálculo dos alimentadores deve-se atribuir um módulo superior ao módulo do ponto quente do fundido para garantir o caminho de solidificação.

O módulo do alimentador M_{al} é determinado multiplicando o módulo M_p obtido na peça ou zona da peça, por um fator de segurança k [1].

$$M_{al} = k M_p \tag{2.2}$$

Na Tabela 2.4 mostra exemplos de coeficientes de segurança k .

Tabela 2.4 – Valores de coeficientes de segurança k segundo GabeL [3].

Metal	Fator de segurança – k
Ferro fundido de alta resistência	1,0 – 1,2
Ferro fundido perlítico normal	0,8 – 1,0
Ferro fundido para lingoteiras	0,6 – 0,8
Ferro fundido maleável	1,4
Ferro fundido esferoidal	1,4
Aço	1,2
Níquel, cupro-níquel, metal monel, cupro-alumínio	1,4
Cobre, bronzes, latão 70/30 e 60/40	1,2
Latão de alta resistência	1,4
Ligas leves	1,4

Pode-se considerar ainda a situação do alimentador em relação ao enchimento, pelo que se deverá, sempre que seja possível, colocar o alimentador sobre um ataque, de tal forma que passe um volume considerável de metal quente pelo alimentador durante o enchimento da moldação. O material da moldação aquecerá e o metal no alimentador permanecerá líquido durante mais tempo. Pelo contrário, o metal arrefecerá, se tiver de percorrer toda a peça antes de chegar ao alimentador, o que reduz a eficácia deste. Para atender aos fatores citados poderá atribuir-se ao alimentador um fator C, que exprime o arrefecimento do metal. O módulo real, M_{al} , será então igual ao módulo geométrico, M_g , a dividir por C [1].

$$M_g = \frac{V}{S} \quad (2.3)$$

$$M_{al} = \frac{M_g}{C} \quad (2.4)$$

A Tabela 2.5 mostra os valores do coeficiente C.

Tabela 2.5 - Valores do coeficiente C segundo Gabel [3].

Situação do Alimentador	C
Alimentador que recebe metal da peça	1,1
Alimentador colocado sobre um ataque	1
Alimentador com forte passagem de metal	0,8 – 0,9
Alimentador com envolvimento exotérmico	0,63 – 0,66

A utilização de uma camisa exotérmica aumenta o módulo de arrefecimento de um alimentador, aumentando assim, o rendimento do mesmo, logo um alimentador com camisa exotérmica pode ser mais pequeno do que um alimentador sem camisa de igual módulo [1].

2.5.2. Volume dos alimentadores

Para garantir a sanidade de um fundido não é suficiente satisfazer apenas os requisitos do módulo do alimentador, é também necessário que este possua volume suficiente de modo a compensar a contração [9].

O volume do alimentador pode ser calculado pela equação (2.5), havendo outros métodos semelhantes.

$$V_{alimentador} = V_{peça} \times \frac{\beta}{\mu - \beta} \quad (2.5)$$

Onde:

β – Contração específica da liga;

μ – Rendimento do alimentador, cerca de 65%;

$V_{peça}$ – Volume da peça;

Depois de calculados o módulo e o Volume do alimentador, opta-se pelo que tenha o maior módulo cumprindo sempre os dois requisitos.

Em alguns casos no cálculo do módulo do alimentador, depara-se com situações em que o volume disponível é superior ao volume necessário, logo o respetivo alimentador tem a capacidade de alimentar mais do que uma peça. O número de peças capazes de serem alimentadas por um alimentador é obtido pela equação (2.6):

$$n^{\circ} \text{ peças} = \frac{V_{alimentador}(\text{critério do módulo})}{V_{alimentador}(\text{critério do volume})} \quad (2.6)$$

2.5.3. Determinação da distância da alimentação ou raio de ação

É perceptível que na atuação de um alimentador num fundido haja um raio limite na atuação do mesmo, por este motivo deve ser colocado o mais próximo possível do ponto quente para um melhor desempenho do mesmo, quanto mais longe do ponto quente

pior o desempenho até que a determinada distância deixa de funcionar em relação ao ponto quente, formando assim porosidade no fundido.

Depois de muito estudo experimental, foi determinado as distâncias de alimentação. Um dos nomes influentes no estudo da distância de alimentação é Pellini [9]. De acordo com Pellini et al [9], a distância de alimentação D de placas de aço ao carbono em fundição de areia depende da espessura T da secção do fundido e a distância da parede do fundido ao alimentador é $4,5T$, sendo que $2,5T$ resulta do efeito arrefecedor da parede do fundido e $2,0T$ resulta do efeito do alimentador. A adição de um arrefecedor aumenta distância da alimentação de aproximadamente 50mm, como mostra a Figura 2.10 [9].

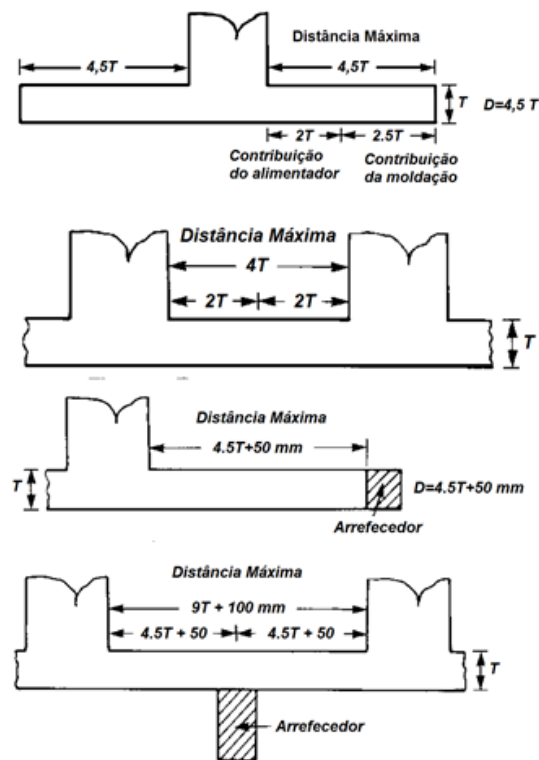


Figura 2.10 – Distâncias da alimentação em placas de aço fundido em moldações de areia [22].

Pellini et al [9] descobriram também que o aumento do tamanho do alimentador não tem efeitos benéficos na promoção da solidez.

Uma outra forma mais simples de aplicar o critério da distância é, desenhar um círculo centrado no alimentador com um raio de dimensão igual à distância de alimentação, mais o raio do alimentador. Assim, a secção do fundido situada dentro do círculo é a zona alimentada.

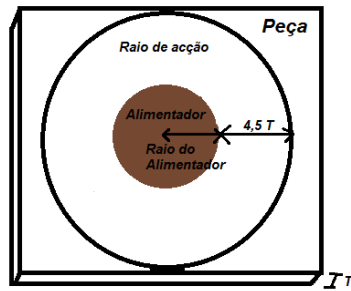


Figura 2.11 – Critério da distância da alimentação desenhando um círculo a partir do centro do alimentador.

Um exemplo da aplicação de um caso prático do cálculo do sistema de alimentação encontra-se no Anexo 1.

2.6. Sistema de Gitagem

O sistema de gitagem é constituído por um conjunto de canais e ataques por onde o metal é vazado e escoa até preencher as cavidades do molde ou moldação com o dever de assegurar que o metal não solidifique até todas as cavidades tenham sido preenchidas.

Os componentes básicos deste sistema são mostrados na Figura 2.12.

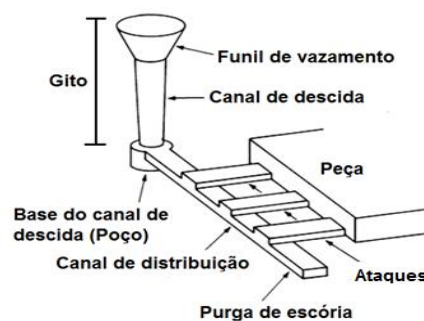


Figura 2.12 – Sistema de Gitagem [22].

O funil ou bacia de vazamento permite que o metal líquido o preencha completamente para que o sistema se mantenha pressurizado, evitando assim entrada de gases. O canal de descida é a coluna onde o metal líquido vai-se unir aos canais. O canal de distribuição é responsável para que o metal chegue aos ataques, sendo estes os responsáveis pela entrada do metal nas cavidades do fundido.

Ao projetar o sistema de gitagem é necessário ter em conta algumas variáveis que permitam obter um fundido isento de defeitos. A seguir serão descritos algumas considerações importantes para o dimensionamento de um sistema de gitagem.

- Enchimento rápido do molde;

A importância deste requisito baseia-se na perda de calor em secções finas, que está diretamente relacionada com a fluidez de metal líquido. Quanto maior for o sobreaquecimento, mais tempo o metal líquido fluirá nos canais, portanto um canal muito fino pode gerar uma solidificação prematura do metal líquido.

- Evitar a turbulência;

O escoamento turbulento do metal líquido no sistema é caracterizado pela aleatoriedade, movimentos tridimensionais de partículas de um fluido sobrepostas ao movimento principal, em outras palavras, é uma desorganização dos átomos ou moléculas no escoamento. Este tipo de fluxo pode arrastar gases para o interior da peça, além de ser suscetível à formação de escória e óxidos metálicos e causar inclusões.

- Evitar a erosão do molde;

O excesso de velocidade de enchimento aliado ao mau direcionamento do fluxo metálico pode gerar a quebra de paredes do molde, que serão levadas para as cavidades dos fundidos, gerando defeitos de inclusões no fundido. A existência de cantos vivos ajuda esse tipo de fenômenos, ou seja, sempre que possível é necessário retirá-los, pois facilita a etapa de moldação.

- Retirar escória e inclusões;

Estas são partículas geradas dentro ou fora do molde, como por exemplo, as paredes refratárias do forno. Um recurso disponível para que essas inclusões não penetrem o fundido vazado é a utilização de filtros cerâmicos é um processo muito eficiente, porém aumenta o custo de produção.

Como partículas não metálicas do tipo óxidos possuem geralmente densidades menores que ligas metálicas, elas tem a tendência a flutuar no metal líquido. Portanto, aumentar o canal de distribuição, cria pequenas cavidades na parte superior deste canal e criar

purga de escória, fazendo com que o primeiro metal que passe pelos ataques seja limpo e quente, ajudando a prevenir a ocorrência de inclusões não metálicas no fundido.

- Solidificação direcionada;

Criar um gradiente térmico é sempre benéfico, devido ao facto do último metal a entrar na cavidade da peça, faz-lo na parte onde existe um “ponto quente”. Portanto, deve-se promover uma solidificação direcionada, do fundido para o alimentador, de modo que o metal preencha por último o alimentador.

2.6.1. Princípios de mecânica dos fluidos aplicados ao escoamento de metais líquidos.

Alguns princípios básicos da mecânica dos fluidos são necessários para o projeto de um sistema de alimentação e enchimento. A aplicação destes conceitos auxilia-nos e garante que o metal líquido preencha todas as cavidades do molde sem problemas e de forma económica. Entre eles destacam-se o teorema de Bernoulli e a equação da continuidade.

2.6.1.1. Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli é um princípio da mecânica dos fluidos que relaciona pressão, velocidade e energia potencial ao longo de uma linha de fluxo, onde é aplicado a sistemas de gitagem, em outras palavras ele relaciona a energia potencial mecânica de um fluido com a energia cinética de escoamento. Ele é válido apenas para o fluxo contínuo, incompressível e sem atrito ao longo de uma linha de escoamentos de um fluido.

Com estas condições não se aplicam na prática devido ao facto do contacto entre metal líquido e o molde gerar atrito, além das perdas de carga ao longo do sistema de enchimento, são atribuídos fatores que englobam estas condições. Então, o teorema de Bernoulli pode ser expresso pela equação (2.7).

$$\left(\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_1}{\rho} \right) = \left(\frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{P_2}{\rho} \right) + K \quad (2.7)$$

Onde,

v – Velocidade do fluido (m/s);

g – Aceleração da gravidade (m/s^2);

h – Altura do metal (m);

P – Pressão do fluido (N/m^2);

ρ – Densidade do fluido (Kg/m^3);

O ponto 1 corresponde à bacia de vazamento e o ponto 2 à base do gito.

Algumas considerações sobre este tema são relevantes, como, por exemplo, que a equação só se torna válida no momento em que o canal de descida está completamente cheio e existe um fluxo contínuo do fluido. No funil de vazamento, na parte superior do molde, a velocidade deve ser considerada nula. A pressão na parte superior é atmosférica, da mesma maneira que no momento em que o metal líquido começa a escoar, a pressão dos gases no interior do molde também é atmosférica, então [29]:

$$v_1 = 0 \quad e \quad P_1 = P_2 = P_{atm}$$

Simplificando a equação de Bernoulli (2.8):

$$\frac{v_2^2}{2g} = h_1 - K \tag{2.8}$$

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - K)} \quad ou \quad v_2 = K\sqrt{2g \times h_1}$$

O coeficiente “ K ” é devido a perdas por atrito portanto depende do material usado na moldação. O seu valor para ferro fundido e aço em moldações de areia é $K=0,2 \sim 0,8$ [29].

2.6.1.2. Lei da continuidade

A lei da continuidade estabelece que, para um sistema cheio com um líquido incompressível, de paredes impermeáveis o caudal será o mesmo em todos os pontos do sistema.

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{2.9}$$

Onde:

Q - caudal (m^3/s);

A - área da secção reta ocupada pelo fluido (m^2);

v - velocidade do fluido (m/s);

Os subscritos designam diferentes zonas do sistema.

Uma aplicação prática da lei da continuidade é ilustrada na Figura 2.13. A velocidade do fluido aumenta na queda, pelo que a área da secção reta diminui. Por este motivo, o gito de descida é geralmente cónico.

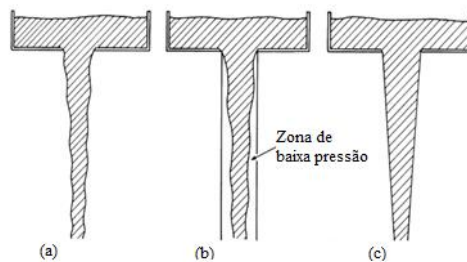


Figura 2.13 - Perfil do fluido metálico: (a) em queda livre; (b) dentro de um gito de paredes paralelas; (c) dentro de um gito cónico [22].

Se o gito for de paredes paralelas, a passagem do metal a alta velocidade gera uma zona de baixa pressão que promove a aspiração de ar da moldação. Por sua vez, o gito cónico acompanha o fluido que está sempre em contacto com as paredes de areia. Deste modo, minimiza-se a aspiração de ar e a turbulência da superfície.

Por vezes, tenta-se imitar o efeito do gito cónico, colocando uma restrição ou estrangulamento próximo da sua base, tal como esquematizado na Figura 2.14, focando o enchimento rápido [22].

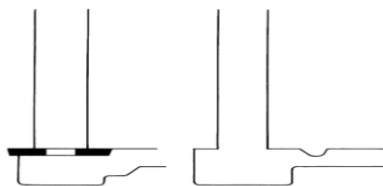


Figura 2.14 – Técnicas comuns de estrangulamento do fluido [22].

2.6.1.3. Número de Reynolds

O escoamento de um fluido pode ser caracterizado de duas formas, laminar e turbulento. O escoamento laminar pode ser descrito como um movimento organizado das moléculas, onde não ocorre uma “mistura” do fluido, isto é, o fluxo sucede de maneira calma. O escoamento turbulento é caracterizado pela desorganização dos átomos ou moléculas no escoamento, onde ocorre movimentos tridimensionais de partículas sobrepostas ao movimento principal.

Esses tipos de escoamento podem ser informados por um número adimensional, chamado de número de Reynolds, o qual pode ser determinado pela equação (2.10) [22].

$$N_R = \frac{vd\rho}{\mu} \quad (2.10)$$

Onde:

N_R - número de Reynolds;

v - velocidade do líquido (m/s);

d - diâmetro do canal de líquido (m);

ρ - peso específico do líquido (Kg/m³);

μ - viscosidade (Pas).

Se o número de Reynolds for inferior a 2000, o escoamento é laminar. Se o número de Reynolds for superior a 20000, o escoamento é turbulento. Se o número de Reynolds se situar entre 2000 e 20000, o escoamento é misto, verifica-se turbulência no interior do metal com uma camada à superfície que apresenta fluido laminar. Um fluido com estas características é aceitável pois impede que óxidos e outras impurezas superficiais contaminem o fundido, contudo o escoamento ideal é o escoamento laminar [22].

2.6.1.4. Velocidade crítica de enchimento

Na entrada do metal na cavidade de moldação, o fator velocidade tem um papel determinante no que diz respeito à qualidade da superfície. Para uma boa qualidade da mesma, o metal deve entrar de modo que a frente do metal avance somente a distância,

cuja tensão superficial possa preservar a integridade da superfície, para isso, existe uma velocidade ótima, velocidade essa que para ligas densas como ferros e aço, essa velocidade assume o valor de 0,4 m/s [9].

A gota de metal líquido, que se move a uma velocidade próxima da velocidade crítica, encontra-se em equilíbrio. A tensão superficial mantém a forma compacta dessa gota opondo-se à pressão que faria com que o metal se espalhasse por ação da gravidade. Esta gota que se expande lentamente é parecida com uma gota sésil, cuja altura para o ferro líquido é de 10 mm [30].

Se a altura de uma perturbação presente na superfície do banho, resultante do facto da velocidade de enchimento ultrapassar a velocidade crítica, exceder a altura da gota sésil, o líquido deixa de ser suportado pela tensão superficial. Essa perturbação da superfície irá colapsar, sob ação da gravidade, e penetra no interior do metal líquido. A formação dessa perturbação está apresentada na figura seguinte. Ao exceder a velocidade crítica, a energia cinética é suficiente para produzir tal perturbação devido a turbulência superficial [9].

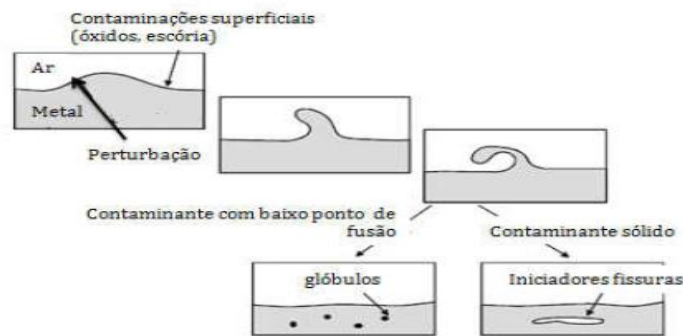


Figura 2.15 – Turbulência superficial em metais líquidos [30].

A condição de velocidade crítica não recomenda a colocação de ataques em zonas do fundido que provocam a queda do metal de alturas superiores a 10mm, a altura de uma gota sésil. O requisito de altura de queda crítica só se aplica necessariamente do gito de descida para a frente, onde o metal deve avançar num plano horizontal ou em oposição à força gravítica (de baixo para cima) [9].

2.6.2. Tempo máximo admissível de enchimento

Os tempos máximos de enchimento das moldações são determinados por fatores tais como o tipo de metal vazado e da espessura mínima da peça de fundição. Assim que o

tempo máximo admissível de enchimento é estabelecido, os princípios de escoamento de fluidos são aplicados para determinar a área da seção transversal mínima dos canais, necessária para dar passagem ao fluxo com um mínimo de metal requerido. Depois de obter o tempo de enchimento, os restantes parâmetros, como gito, canais de distribuição e ataques, facilmente serão calculados. O tempo de enchimento pode ser calculado a partir da equação (2.11) [1].

$$t_{m\acute{a}x} = \left(0,4 \times \left(1,4 \times \frac{e}{14} \right) \right) \times \sqrt{pc} \quad (2.11)$$

Onde e é a espessura mais fina da peça e pc é o peso do cacho.

2.6.3. Elementos de um sistema de gitagem

Aplicando os conhecimentos sobre escoamento de fluidos para o projeto de um sistema de gitagem específico, é necessário tomar muitas decisões de conceção antes de dimensionar os diversos componentes. Este processo é muito importante em fundição, tendo em conta todas as formalidades para o dimensionamento do sistema de gitagem. De seguida, fornecem-se indicações sobre um exemplo de cálculo de um sistema de gitagem.

2.6.3.1. Bacia de vazamento

Tem como objetivo facilitar a receção do metal que cai da colher de vazamento. Por outro lado, deve ser cheia tão depressa quanto possível, de modo a manter-se cheia durante todo o enchimento da cavidade de moldação. Se assim suceder, as escórias têm uma tendência natural a sobrenadar no banho. Finalmente, não devem facilitar a criação de remoinhos, dado provocarem a absorção de gases para o interior do fluxo metálico [21].

A bacia cónica é a bacia mais utilizada nas fundições porque é fácil de moldar, porém devia ser evitado o uso do mesmo porque apresenta alguns problemas.

O metal entra com uma velocidade difícil de controlar que por vezes é elevada tornando-se complicado a redução da turbulência e o cone atua como um venturi, aspirando ar.

O sistema ideal a utilizar seria a utilização de uma bacia de fundo plano como na Figura 2.16 (b), que ajudasse a controlar a velocidade de entrada do metal antes de entrar no gito.

Contudo, ainda existe um problema que é o facto de o metal se deslocar a alta velocidade através da parte superior do canal de entrada, atingindo o lado oposto, havendo uma tendência para o metal fluir para baixo apenas por um dos lados do gito, como mostra a Figura 2.16 (b).

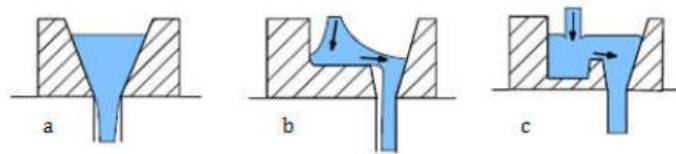


Figura 2.16 – Diferentes bacias de vazamento: (a) cónica; (b) de fundo plano; (c) de fundo plano com eliminação da velocidade horizontal [39].

A melhor opção está representada na Figura 2.16 (c), que consiste na introdução de um degrau no fundo plano da bacia, de modo a diminuir a velocidade do metal na entrada do gito, assegurando assim um preenchimento completo do gito aquando o vazamento do metal [30].

2.6.3.2. Gito de descida

A geometria do gito de descida deve coincidir com a forma do fluido de metal em queda livre, o que é conseguido moldando um funil longo. O metal deve manter-se sempre em contacto com a areia, comprimindo-a ligeiramente pois, caso contrario, o gito demora mais tempo a encher e a expulsar o ar do sistema; o ar promove a oxidação do ligante da areia e o metal tem espaço para se mover de modo turbulento, provocando erosão da moldação [9].

A base do gito tem o objetivo fundamental de receber o metal e reduzir a velocidade de escoamento do fluxo que acelerou desde a entrada até à base do gito de descida. A sua secção é geralmente menor, quando comparada com o poço [21].

Cálculo do sistema de gitagem:

Antes de calcular a área do canal de descida é necessário determinar a velocidade de escoamento do metal líquido na base do canal de descida:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - K)} \text{ ou } v_2 = K\sqrt{2g \times h_1} \quad (2.12)$$

Onde:

K – coeficiente que depende de muitos fatores, como o material de moldação e forma dos canais. O valor usado varia entre 0,2 e 0,8. Valores perto de 0,8 resultarão em velocidades maiores. Esse coeficiente quantifica o atrito entre o metal líquido e as perdas do molde.

g – aceleração da gravidade, equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$.

h_1 – altura da colher de vazamento até a base do gito de descida (m).

O próximo passo do procedimento é o cálculo da área do gito, assim como o diâmetro da base do gito.

Área do gito:

$$A_g = \frac{V_{metal}}{v_2 \times t_{max}} \quad (2.13)$$

Onde:

V_{metal} – Volume de metal a ser vazado de modo a preencher todas as cavidades do molde, onde inclui o volume da peça, sistema de alimentação e sistema de gitagem, (m^3).

v_2 – Velocidade na base do gito, (m/s).

$t_{máx}$ – Tempo necessário para o enchimento da moldação que pode ser calculado com a equação (2.11), (s).

Diâmetro do gito

$$D_{bg} = 2 \times \sqrt{\frac{A_g}{\pi}} \quad (2.14)$$

A estrutura do gito deverá seguir a seguinte configuração

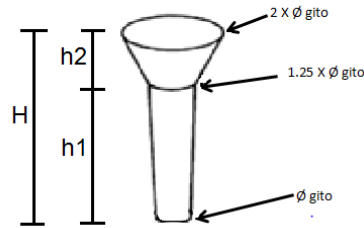


Figura 2.17 – Dimensionamento do gito

A altura do gito, H, depende da altura da peça, altura do ataque na peça e da experiência do operador. Um exemplo de relação utilizado é:

$$h1 = 0,75 \times H \quad (2.15)$$

$$h2 = 0,25 \times H \quad (2.16)$$

Posteriormente ao cálculo do diâmetro do gito deve-se verificar o tipo de escoamento existente no gito. Como já foi referido anteriormente, o escoamento ideal é o escoamento laminar.

$$N_R = \frac{v_2 D \rho}{\mu} \quad (2.17)$$

Onde,

v_2 – Velocidade na base do gito;

D – Diâmetro da base do gito

ρ – Peso específico do líquido (Kg/m^3);

μ – Viscosidade (Pas).

As propriedades da liga apresentam-se na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Propriedades dos materiais no estado líquido a 1620°C [26].

Propriedades	Material	
	Ferro Fundido	Aço
Viscosidade Absoluta (μ)	$3,72 \times 10^{-2} \text{ Kg/ms}$	$6,2 \times 10^{-2} \text{ Kg/ms}$
Peso específico (ρ)	6100 Kg/m^3	6980 Kg/m^3

Como já foi referido o regime de escoamento classifica-se de acordo com o número de Reynolds.

2.6.3.3. Poço do gito de descida

Na ausência de um poço do gito de descida, o metal atinge o fundo do gito e espalha-se horizontalmente ao longo do canal de distribuição gerando uma zona de alta pressão (+P) que provoca erosão na moldação, e uma zona de baixa pressão (-p) que promove a aspiração de ar através da moldação permeável, tal como esquematizado na Figura 2.18.

Se o poço for demasiado fundo, o metal rodopia sobre si de modo turbulento [30].

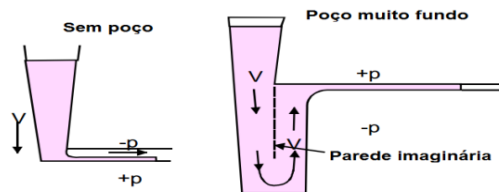


Figura 2.18 – Comportamento do fluido de metal na ausência e presença de poço do gito de descida [30].

Cálculo do poço do gito de descida.

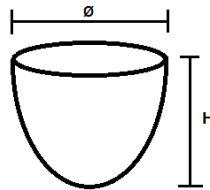


Figura 2.19 – Estrutura do poço.

Diâmetro do poço ($\phi_{poço}$):

$$\phi_{poço} = \phi_{base\ do\ gito} \times 1,5 \quad (2.18)$$

Onde $\phi_{base\ do\ gito}$ é o diâmetro da base do gito.

Altura do poço (H):

$$H = \phi_{poço} \times 1,2 \quad (2.19)$$

2.6.3.4. Canais de distribuição e ataques

Os canais de distribuição são geralmente horizontais para poderem ser colocados sob o plano de apartação. Contudo, o requisito de altura máxima de queda é mais facilmente cumprido se o metal entrar na zona mais baixa da cavidade. Se assim for, o canal de distribuição tem que se encontrar num plano inferior ao do fundido.

Para moldações de apartação horizontal, este tipo de técnica exige a introdução de um plano de apartação adicional ou de um macho, o que representa custos acrescidos. Os ataques devem encontrar-se sempre acima do canal de distribuição, evitando assim que o primeiro metal entre na cavidade, e para que só comecem a encher depois de o ar ter sido expulso do sistema. Além disso, permite que a escória flutue o tempo suficiente, devido à diferença de densidades entre os materiais, boa parte ficara aprisionada no topo dos canais de distribuição [9].

No dimensionamento dos canais de distribuição, deve-se fazer a escolha de um sistema pressurizado ou não pressurizado.

Algumas recomendações são válidas para o canal de distribuição, tais como, aumentar um pouco o fim do canal de modo a funcionar como purga de escória, reduzir as secções transversais do canal de forma a compensar as perdas de carga e manter pressões e velocidades iguais nos canais de ataque.

Cálculo do canal de distribuição:

Para o cálculo do canal de distribuição, começa-se por calcular a área do mesmo pela equação ((2.20).

$$A_{\text{canal de dis.}} = A_g \times \text{relação do sistema} \quad (2.20)$$

Onde,

A_g – Área do gito;

relação do sistema – É a relação em função do sistema pretendido, pressurizado ou não pressurizado.

Um fator a ter em conta é o facto de o cacho possuir mais do que um canal. Se for utilizado mais do que um canal de distribuição, terá de se dividir a área do canal pelo respetivo número de canais.

$$A_{canal\ de\ desc.} = \frac{A_{cd}}{n} \quad (2.21)$$

Onde,

n – número de canais a utilizar.

A área resultante da equação anterior será a área para cada canal.

Posteriormente ao cálculo da área considera-se a forma de um retângulo de modo a calcular as suas dimensões do canal de distribuição como mostra a Figura 2.20.

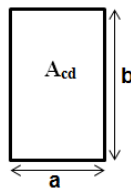


Figura 2.20 – Estrutura do canal de distribuição.

$$a = \sqrt{A_{cd}} \times 0,85 \quad (2.22)$$

$$b = \sqrt{A_{cd}} \times 1,15 \quad (2.23)$$

Cálculo do ataque:

No cálculo do ataque o procedimento é o mesmo que no cálculo do canal de distribuição, alterando apenas o fator de relação do sistema para o cálculo da área do ataque (A_{atq}) e a estrutura do ataque invertendo o retângulo.

$$A_{atq} = A_g \times r \quad (2.24)$$

Onde,

A_g – Área do gito;

relação do sistema – É a relação em função do sistema pretendido, pressurizado ou não pressurizado.

Cálculo da área para mais do que um ataque.

$$A_{atq} = \frac{A_{atq}}{n} \quad (2.25)$$

Onde n corresponde ao número de ataques a utilizar.

Cálculo das dimensões do ataque.

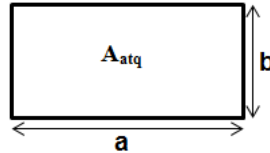


Figura 2.21 – Estrutura do ataque.

$$a = \sqrt{A_{atq}} \times 1,25 \quad (2.26)$$

$$a = \sqrt{A_{atq}} \times 0,75 \quad (2.27)$$

A aplicação prática de um sistema de enchimento encontra-se no Anexo 3.

2.6.4. Filtros cerâmicos nos sistemas de gitagem

Os filtros cerâmicos são atualmente, utilizados na indústria de fundição para melhorar a pureza dos fundidos e reduzir o seu custo de produção. Estes são introduzidos nos sistemas de gitagem com uma função de regular a velocidade, remover a escória e outras impurezas, tais como partículas não metálicas, antes de entrar na cavidade da moldação. A maioria das ligas para fundição está sujeita à presença de partículas que podem afetar prejudicialmente o aspeto e as propriedades físicas dos fundidos. Nestas partículas inclui-se normalmente:

- Óxidos formados durante a fusão e o vazamento;
- Partículas refratárias do forno de fusão e da colher de fundição;
- Partículas refratárias presentes no sistema de gitagem ou arrastadas da moldação ou dos machos durante o enchimento [1];

2.6.4.1. Colocação dos filtros

A localização e a posição dos filtros cerâmicos são influenciadas pelo método de moldação, saídas do molde e pela experiência de cada empresa.

O tamanho e número de filtros necessários são determinados pelo peso da carga de metal a vaziar e pela capacidade de cada filtro utilizado. À medida que a filtragem vai decorrendo, as células individuais do filtro vão ficando bloqueadas e a velocidade a que o filtro deixa passar o metal vai diminuindo [1].

Nas moldações de linha de apartação horizontal, os filtros são colocados como mostra na Figura 2.22.

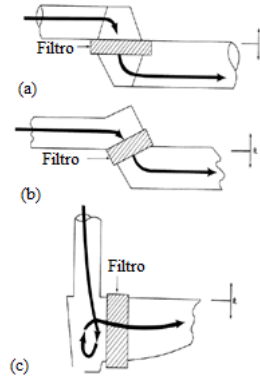


Figura 2.22 – Locais de colocação de filtros em moldações com linha de apartação horizontal, em (a) e (b) entre 90° e 0° da linha de apartação e em (c) paralelo à linha de apartação [1].

Os filtros não devem ser colocados na base gito, porque aumenta a possibilidade do filtro se fraturar e reduz a sua eficácia. Nas moldações com linha de apartação vertical os filtros são colocados normalmente como apresentado na Figura 2.23. Apesar do filtro na bacia de vazamento ser muito utilizado, os filtros são mais eficazes quando colocados no canal de gitagem [1].

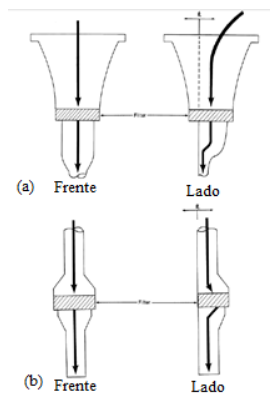


Figura 2.23 – Locais de colocação de filtros em sistemas de gitagem vertical, em (a) colocação à saída da bacia de vazamento e em (b) colocação do filtro no canal de gitagem [1].

2.7. Influência da temperatura de vazamento do material

O vazamento de metal líquido no interior das moldações é uma das fases mais importantes em fundição, uma vez que o comportamento do metal líquido durante o vazamento e a sua solidificação vai determinar a sanidade do fundido.

O sucesso da operação, vazamento do metal líquido, depende por vezes da qualidade do próprio metal, por exemplo, composição química, temperatura de vazamento, assim como, de outras propriedades, configuração do sistema de gitagem e respetivas propriedades da moldação [29].

O metal líquido apresenta uma temperatura onde se inicia o processo de solidificação e uma temperatura onde termina esse processo, havendo a mistura de sólido e líquido dentro da faixa de temperaturas em que ocorre a solidificação. A temperatura de vazamento deve ser sempre de sobreaquecimento, isto é, acima da curva de *liquidus*. O vazamento, dentro de uma faixa de temperaturas onde se tem sólido e líquido prejudica o preenchimento completo do molde devido à fluidez do material [29].

A fluidez depende de características do metal e de parâmetros utilizados na fundição. No que se refere ao metal, a fluidez depende da densidade, viscosidade, tensão superficial, inclusões e padrão de solidificação do material. No que se refere aos parâmetros de fundição, a fluidez depende do projecto do molde, sistema de gitagem e alimentação, material do molde e do seu acabamento superficial, grau de superaquecimento, taxa de vazamento e transferência de calor [29].

A fluidez não pode ser avaliada a partir das propriedades físicas individuais, alguns testes experimentais foram desenvolvidos por Clark e Krynitsky, para medir as características gerais num material. Os testes baseiam-se em condições semelhantes às da moldação de metais de fundição medindo a fluidez como a distância percorrida pelo metal fundido em sistemas normalizados de canais fechados antes da cessação do fluxo [29].

2.8. Programas comerciais de simulação numérica

Na atualidade, os clientes de peças fundidas exigem cada vez mais, peças com melhor qualidade. Isto reflete-se nos pedidos de peças com maior precisão dimensional, melhor acabamento superficial e com uma qualidade metalúrgica íntegra. Estes atributos de

qualidade só têm sido possíveis pelos avanços tecnológicos aplicados à área de fundição.

Para cumprir os requisitos inerentes à qualidade deve-se implementar sistemas e procedimentos seguros e fiáveis, tendo como objetivo, eliminar potenciais defeitos existentes em fundição.

Atualmente, com o avanço da tecnologia torna-se possível a utilização da simulação numérica na indústria de fundição para prever a formação de defeitos. Uma vez a análise completa, o utilizador critica os resultados e, caso seja necessário, introduz uma modificação. O ciclo repete-se até se obter o resultado desejado, isto é, um fundido sem defeitos relevantes. Assim, o tradicional ciclo de tentativa e erro na fundição foi substituído pela simulação em computador, sendo esta tecnologia vantajosa a nível do tempo e a nível económico.

Os programas de simulação numérica utilizados neste trabalho foram o *SOLIDCast*® e o *FLOWCast*®, versão 8.2.0, produzidos e pertencentes à *Finite solutions incorporated*, e disponibilizados pela empresa FAL (Fundição Alto da Lixa, S.A.) detentora da Licença dos mesmos.

2.8.1. SOLIDCast®

SOLIDCast® é um programa de simulação numérica para fundição, capaz de simular fundidos no método de fundição em areia e moldação permanente para uma grande variedade de ligas metálicas.

Um dos principais objetivos deste é o de prever defeitos que podem ocorrer na fundição durante o processo de solidificação de um fundido. O processo de simulação numérica com este programa, após a criação dos modelos num programa de *CAD*, inicia-se com a criação de uma malha, este passo consiste na divisão do modelo em pequenos elementos para permitir o cálculo das transferências de calor envolvidas no processo de solidificação. O *SOLIDCast*® usa o Método das Diferenças Finitas neste cálculo. A malha é constituída por pequenos cubos. Uma vez definidos os parâmetros de rede, este processo é automático. As alterações de temperatura determinadas numericamente serão utilizadas para traçar gráficos de diferentes critérios de modo a prever diversos tipos de defeitos em fundição [31].

2.8.2. FLOWCast®

FLOWCast® é um módulo do programa *SOLIDCast®* e tem como função a simulação do fluxo na cavidade das moldações durante o enchimento, recorrendo a uma solução numérica da equação de fluidos *Navier-Stokes* conhecida como *CFD (Computational Fluid Dynamics / Dinâmica de fluidos computacional)*. Este módulo possibilita a visualização de linhas de fluxo do metal ajudando assim o utilizador a prever qualquer movimento ou turbulência excessiva que possa ocorrer. O *FLOWCast®* também pode ser utilizado para prever o comportamento das partículas estranhas (óxidos ou sujidade) arrastadas na corrente de metal, a velocidade do metal líquido em qualquer instante, assim como o comportamento do metal relativamente ao sistema de gitagem. Também fornece uma distribuição da temperatura mais realista do molde para uma análise subsequente da solidificação [32].

2.8.3. Outros programas de simulação numérica para fundição

Atualmente existem muitos programas comerciais de simulação no mercado. Estes programas de simulação variam um pouco em relação à finalidade de cada um, abordando diferentes métodos de fundição, diferentes tipos de ligas e diferentes processos de simulação. Contudo, as diferenças entre eles são pequenas e muito centradas na sua aplicação a casos particulares.

Alguns dos programas comerciais de simulação numérica mais conhecidos no mercado estão aqui enunciados.

CastCAE® é um programa de simulação de fundição que usa o método de diferenças finitas criado por *CASTech, Inc.*, na Finlândia. Este afirma ser o primeiro no mundo a trazer simulação para o ambiente *Windows*. Simula o enchimento das moldações, solidificação, propriedades mecânicas e defeitos de fundição [33].

CAPCAST® foi criado por *EKK, Inc.*, fundada em 1991 e sediada em *Michigan, EUA*. Este programa usa o método de elementos finitos (*FEM*) e executa simulação de solidificação, simulação de porosidade, simulação de fluxo e simulação de tensões [34].

MAGMASOFT® foi criado pelo magma, uma empresa alemã fundada em 1988. Usa o método de elementos finitos (*FEM*), executa simulação de solidificação, tensões termoplásticas, tensões residuais e de deformações dos fundidos [35].

MAVIS-FLOW® foi desenvolvido pela *Eidawn Software Limited* na Universidade de *Swansea*, Reino Unido. É um programa que utiliza o método de diferenças finitas (*FDM*), executa simulações de enchimento e solidificação de fundidos [36].

NovaFlow & Solid® foi criado por *Technologies NovaCast* fundada em 1981 no sul da Suécia. Utiliza o método das diferenças finitas (*FDM*), executa simulações de enchimento e solidificação de fundidos [37].

ProCast® foi criado por *Calcom ESI*, fundada em 1991, é uma empresa localizada em Lausanne, na Suíça, que também está envolvida no desenvolvimento e comercialização do programa de simulação metalúrgico *PAMQUICKCAST*®, que permite simular o processo de fundição a partir da solidificação e do enchimento, e *CALCOSOFT*®, dedicado à simulação de processos de fundição contínua. *ProCast*® é baseado na abordagem de métodos dos elementos finitos (*FEM*) e abrange uma ampla gama de sistemas de processos de fundição [38].

SIMTEC® foi criada pela empresa, *RWP* da Alemanha, fundada em 1984. Foi o primeiro líder em simulação no método de elementos finitos (*FEM*), fornece uma gama completa de simulações de fundição [39].

2.8.4. Etapas da análise das simulações

As principais etapas para análise das simulações numéricas seguem os seguintes critérios:

1. Critério do Tempo de Solidificação (*Solidification Time*), neste pretende-se localizar regiões isoladas da peça onde pode existir metal líquido aprisionado, assim como ter a percepção do progresso da solidificação após o vazamento.
2. Critério do Tempo de fração crítica do sólido (*Critical Fraction Solid Time*), este critério é interpretado da mesma forma que o tempo de solidificação, isto é, uma peça fundida deve apresentar um bom arrefecimento progressivo, a partir das extremidades em direção aos alimentadores.
3. Critério densidade do material (*Material Density*), é usado para encontrar as regiões de potencial contração e macroporosidade.
4. Critério Gradiente de Temperatura (*Temperature Gradient*), com este critério é possível determinar o progresso da solidificação, ou seja, verificar a boa ou má direccionalidade da solidificação do fundido. Normalmente, um elevado

gradiente de temperatura é positivo, uma vez que proporciona solidificação direcionada.

5. Critério Velocidade de Arrefecimento (*Cooling Rate*) permite observar a velocidade de arrefecimento da peça, expressa em °C/min e medida em cada nó da malha até atingir o ponto de Niyama na curva de arrefecimento. Como tal, este critério pode ser usado como uma indicação da qualidade do material, uma vez que, regiões do fundido que arrefecem rapidamente têm geralmente uma estrutura de grão mais favorável. As propriedades mecânicas, tais como a resistência, alongamento e dureza são também favorecidas.
6. Critério de Niyama (*Niyama Criterion*), este critério permite a previsão da solidificação direcional. Além disso, pode ser útil na identificação de potencial contração numa linha central do fundido.
7. Critério Pontos Quentes (*Hot Spot*), este critério permite localizar os pontos quentes da peça vazada, através da comparação dos tempos de solidificação ou do tempo crítico de fração sólida entre pontos próximos numa região.
8. Critério FCC (*Custom Criterion*), é utilizado para encontrar regiões do fundido propensas ao aparecimento de microporosidade.

Para uma melhor análise a fim de prever o resultado na produção do fundido, o utilizador pode ainda analisar outros parâmetros.

Capítulo 3

3. Caso de estudo

3.1. Introdução ao caso de estudo

No processo de fundição por vezes acontecem factos inesperados, exemplo disso é o caso de estudo abordado nesta dissertação. Algumas peças que foram projetadas de acordo com as regras analíticas específica dos processos de fundição e com posterior verificação numérica, não foram detetados nem previstos quaisquer defeitos de fabrico. Contudo, no decorrer normal do processo de fabrico, surgem defeitos graves que inutilizam as peças fabricadas. No caso em análise, após o fabrico de aproximadamente dez moldações, foram detetados, em algumas peças, macro-rechupes na região correspondente à zona inferior da moldação, no lado oposto ao ataque. Todavia, esses defeitos ocorriam apenas em algumas peças e estas tinham a mesma formulação do cacho (alimentação e gitagem) das peças saudáveis.

Os rechupes encontrados nas peças caracterizam-se por uma área relativamente extensa com poros internos que nem sempre são visíveis à superfície. Em alguns casos é necessário cortar as peças ou realizar ensaios de ultra-sons para detetar esses defeitos, tal como se pode ver na Figura 3.1.

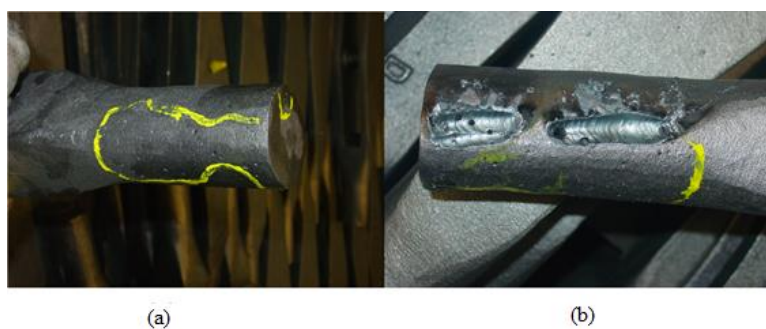


Figura 3.1 - Representação de defeitos visível à superfície em (a) e depois de aberto (b).

Com o objetivo de perceber a razão para surgimento desses defeitos e a possibilidade de os prever, recorrendo a programas de simulação numérica existentes na empresa, desenvolveu-se um estudo pormenorizado de todo o processo de obtenção das peças, desde a fase do projeto até ao abate da moldação.

Na Figura 3.2 está representado o desenho da peça que se pretende obter. Esta peça designa-se por lança de tração e é utilizada para sistemas de engate de reboques especiais de grandes dimensões.

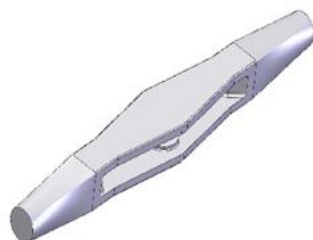


Figura 3.2 – Lança de tração para reboques.

A lança de tração é produzida em moldes contendo quatro peças por cacho. Para defender o interesse dos clientes, o esquema do cacho não vai ser completamente representado.

O material utilizado é um aço de médio carbono ligeiramente ligado. Foi utilizado um filtro na gitagem na moldação desta peça.

O sistema de alimentação foi dimensionado de acordo com as regras enunciadas no ponto 2.5 do capítulo 2. Posteriormente foi implementada uma simulação numérica com os programas *SolidCast*® e *FlowCast*® para verificação do correto dimensionamento. No entanto, realizaram-se também, alguns estudos mais pormenorizados dos parâmetros do processo de fundição que mais podem influenciar a qualidade e sanidade das peças finais.

Os parâmetros analisados foram os seguintes:

- Temperatura de vazamento;
- Sistema de Gitagem;
- Tempo de enchimento.

Estes parâmetros têm um papel determinante durante o enchimento no processo de fundição.

Quanto mais baixa for a temperatura de vazamento, menor é a fluidez do metal líquido que é vazado na moldação, aumentando a dificuldade de circulação do metal na cavidade da moldação. Assim, um fluido mais pastoso provoca o aumento da probabilidade da ocorrência de defeitos nos fundidos. A opção pela análise deste

parâmetro deve-se ao facto de verificar-se que, na prática, quando uma fusão é efectuada para vários cachos, a temperatura de vazamento vai diminuindo ao longo do tempo, podendo, no vazamento dos últimos cachos, ocorrer uma diminuição de 100°C.

Existem várias abordagens para o dimensionamento do sistema de gitagem. A maioria dos processos de dimensionamento de sistemas de gitagem baseia-se em regras empíricas que dependem da experiência do fundidor e do tipo de fundição em que se vai processar o fabrico de uma determinada peça. Assim, duas formulações de gitagem que respeitem as boas práticas de fundição, de acordo com diferentes abordagens, podem ter um comportamento distinto estando teoricamente corretas, no entanto, uma terá melhor desempenho que a outra. Deforma a perceber tais diferenças, foi proposta uma formulação de gitagem diferente da formulação mais comum e que foi descrita no capítulo anterior. Nesta abordagem são também testados diferentes ataques, variando a sua secção característica.

Os ataques têm um papel determinante no comportamento do fluido durante o enchimento, como se pode ver no ponto 2.6.3.4 do capítulo 2, tendo que se respeitar alguns critérios de projeto. Para analisar-se qual a influência dos ataques no aparecimento de defeitos nos fundidos, implementaram-se um conjunto de simulações numéricas, recorrendo aos programas *SOLIDCast*® e *FLOWCast*®, considerando diferentes secções características do sistema de gitagem: o dobro e metade da formulação normal.

O tempo de enchimento é determinado a partir de expressões empíricas que permitem uma boa aproximação do tempo real de enchimento. A maioria dos programas numéricos dedicados à fundição tem integrado uma folha de cálculo que permite a determinação deste parâmetro recorrendo às referidas expressões. Contudo, o tempo de enchimento obtido a partir das expressões empíricas depende da experiência do utilizador, uma vez é necessário introduzir um conjunto de parâmetros que depende do conhecimento prático de quem os introduz, raramente o tempo determinado é exatamente igual á realidade, contudo permite uma boa aproximação que poderá ser muito útil na simulação numérica do processo de fundição. Para determinar a influência do tempo de enchimento no processo de fundição em análise, realizaram-se simulações numéricas considerando diferentes tempos de enchimento: 100 segundos (s), 10 s e 25 s.

O último valor foi determinado recorrendo às expressões empíricas referidas ao longo deste parágrafo.

Tal como referido anteriormente, as simulações foram realizadas com programas de simulação numérica específicos para simulação de processos de fabrico de fundição, mais especificamente, o *SOLIDCast*® e o *FLOWCast*®.

3.2. Simulação numérica da formulação inicial

Nesta fase do trabalho e após a constatação do aparecimento de defeitos durante o processo de fabrico que não foram previstos na fase anterior do projeto, optou-se por realizar uma simulação numérica mais cuidada e pormenorizada utilizando os parâmetros de fundição da formulação inicial, em que ocorriam os defeitos. Os resultados da simulação foram analisados de acordo com os diferentes critérios referidos anteriormente (2.8.4), nomeadamente, tempo de solidificação, tempo de fracção crítica de sólido, densidade do material, velocidade de arrefecimento, gradiente de temperatura, pontos quentes, critério de Nyama e *critério FCC*. Numa primeira análise recorreu-se ao programa de simulação numérica *SolidCast*® e posteriormente simulou-se com o *FlowCast*®.

3.2.1. Simulação com SOLIDCast®

Para a simulação realizada com o *SOLIDCast*® foram analisados os critérios definidos anteriormente.

Tempo de solidificação

De acordo com o critério do tempo de solidificação verificou-se um bom desempenho por parte da alimentação, visto que, não existem zonas de metal isoladas por alimentar e apresenta também, um arrefecimento direcionado, como mostra a Figura 3.3.

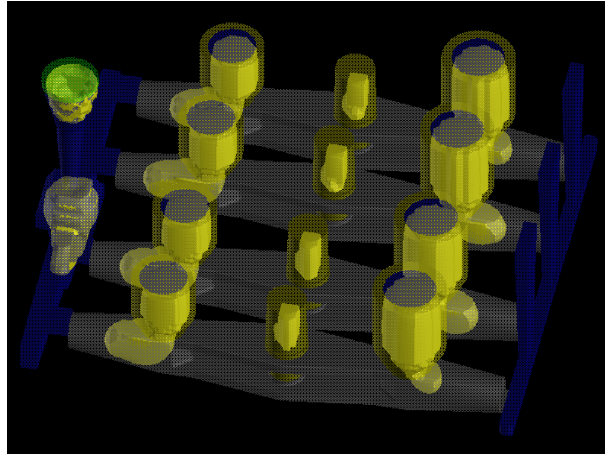


Figura 3.3 – Representação da formulação inicial, na análise do critério tempo de solidificação com $t=8$ min.

Tempo de fração crítica de sólido

Na análise ao critério do tempo de fração crítica de sólido, verificou-se o mesmo fenómeno que no critério tempo de solidificação, isto é, um bom desempenho por parte da alimentação. Isto acontece porque não existem zonas de metal isoladas por alimentar e o fundido apresenta, também, um arrefecimento direccionado, como se pode verificar na Figura 3.4.

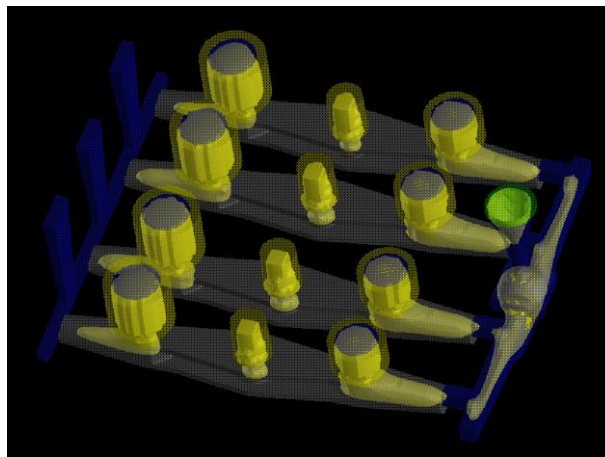


Figura 3.4 – Representação da formulação inicial, na análise do critério do tempo de fração crítica de sólido, $t=3$ min.

Densidade do material

Considerando-se o critério da densidade do material, verificou-se que não existem zonas com probabilidade de aparecimento de macroporosidade devido à contração do material no fundido, como se pode observar na Figura 3.5. As macroporosidades encontram-se nos sistemas de alimentação e gitagem, como seria de esperar.

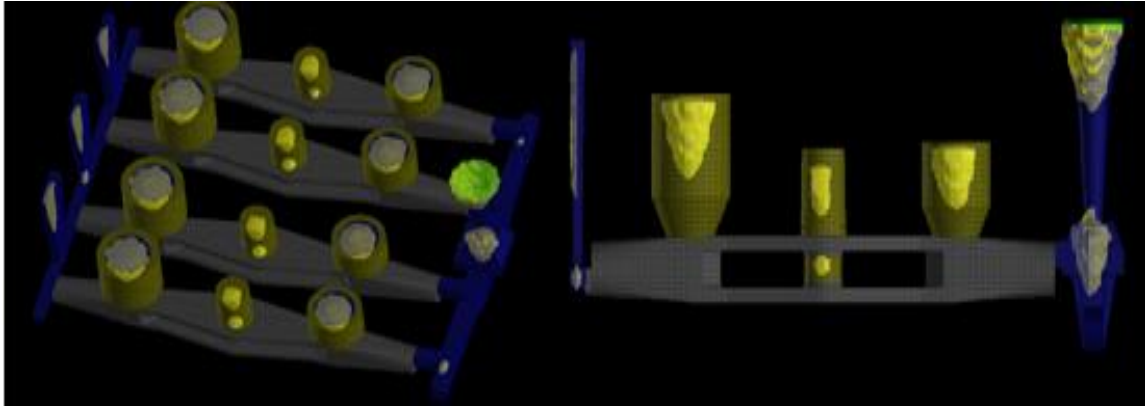


Figura 3.5 – Representação da formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.

Gradiente da temperatura

A Figura 3.6 representa uma análise segundo o critério do gradiente da temperatura, e nela podem observar-se regiões mais claras que representam os menores gradientes de temperatura e regiões mais escuras que indicam maiores gradientes de temperatura. Numa análise mais global, pode afirmar-se que ocorre uma solidificação direcional. Contudo, observando mais cuidadosamente os resultados verifica-se que na região central da peça o gradiente da temperatura é demasiado baixo, logo, a solidificação não é tão direcionada como globalmente poderia transparecer.

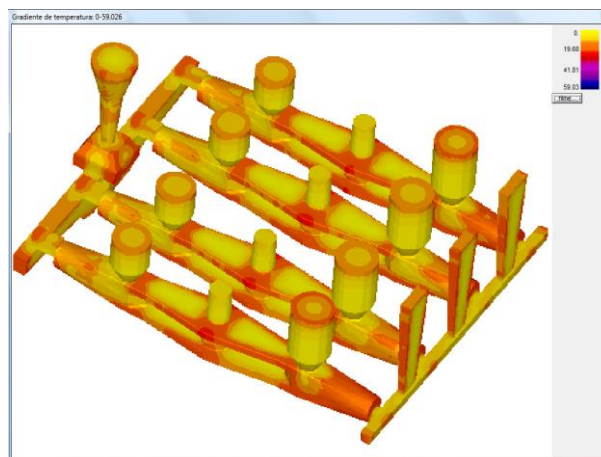


Figura 3.6 – Representação da formulação inicial, na análise do critério gradiente da temperatura.

Velocidade de arrefecimento

Na análise do critério da velocidade de arrefecimento, como se pode observar na Figura 3.7, verifica-se que as zonas assinaladas com um círculo vermelho variam conforme a posição da peça no cacho, isto é, as peças das extremidades do cacho solidificam mais

rapidamente do que as peças centrais. No entanto, regiões do fundido que possuem um rápido arrefecimento têm geralmente uma estrutura do grão mais favorável, assim como resistência, alongamento e dureza.

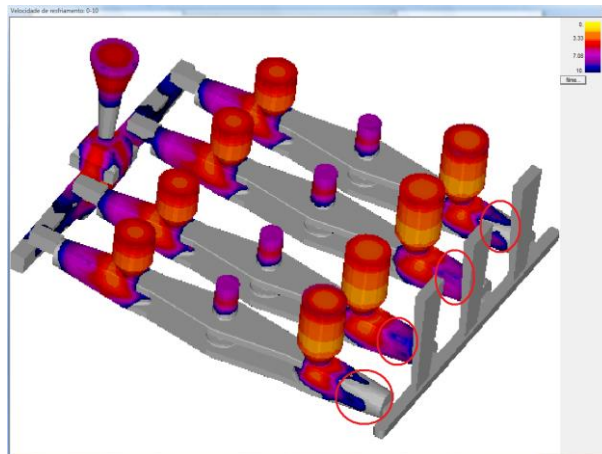


Figura 3.7 – Representação da formulação inicial, na análise do critério velocidade de arrefecimento.

Critério de Niyama

Na análise do critério de Niyama, foi analisado apenas um valor, 0 (zero), que corresponde ao caso mais crítico, como pode verificar-se na Figura 3.8.

De acordo com o critério de Niyama, os valores críticos do aço, material utilizado neste caso de estudo, encontram-se num intervalo entre 0 e 1. Quanto mais perto de zero maior a probabilidade do aparecimento de macroporosidade. Na simulação realizada verificou-se que surgem algumas indicações de macroporosidade à superfície da peça, principalmente nas zonas assinaladas com um círculo vermelho. Com este critério verificou-se um comportamento da solidificação diferente do verificado com os critérios anteriores, isto é, com estes últimos concluía-se que a solidificação ocorria de forma direcionada, não havendo zonas de metal isoladas por alimentar e consequentemente a não existência de macroporosidade nas peças. No entanto, com a análise do Critério de Niyama verificou-se que tal não acontece, e o provável aparecimento de porosidade no fundido pode ter a ver com o mau direcionamento da solidificação.

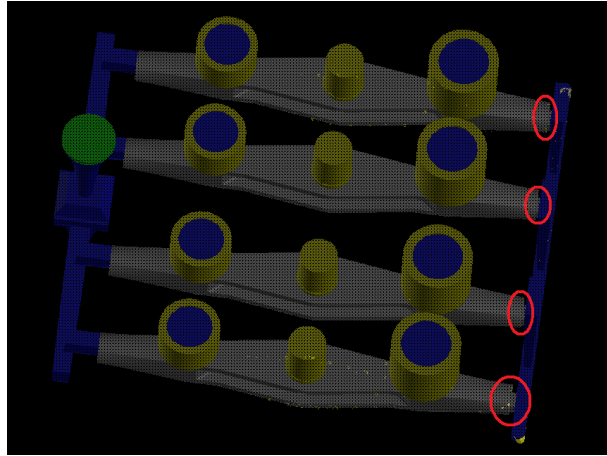


Figura 3.8 – Representação da formulação inicial, na análise do critério de Niyama, com o valor de análise igual a 0 (zero), e com círculo vermelho a identificar as zonas de macroporosidade.

Critério FCC

Na análise do critério FCC, verificou-se a indicação de zonas de microporosidade nas duas peças centrais relativamente ao cacho da peça. O intervalo de valores obtidos da simulação foi entre 0 e 4.45, respeitando o critério de análise utilizando 40% do valor máximo, verifica-se que o valor crítico a analisar é 1.78. Neste caso, pode-se afirmar que se trata de um intervalo de valores relativamente pequeno, reduzindo a probabilidade do aparecimento de microporosidade. Contudo, no caso em estudo verificou-se a ocorrência de valores superiores ao valor crítico, significando, por isso que podem ocorrer microporosidade em algumas regiões da peça, que podem ser observadas nas zonas assinaladas na Figura 3.9.

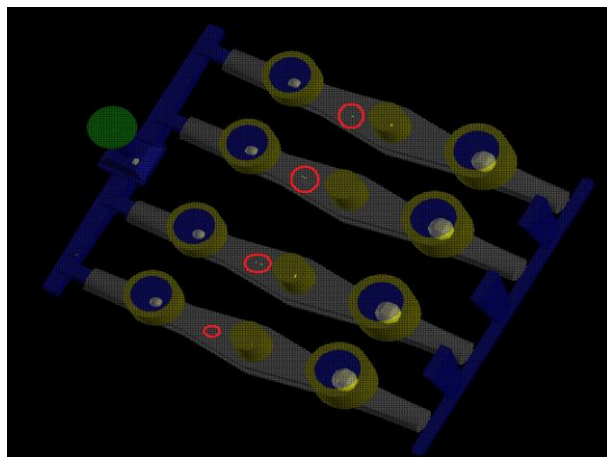


Figura 3.9 – Representação da formulação inicial, na análise do critério FCC, identificando com um círculo vermelho as zonas de microporosidade.

3.2.2. Simulação com FLOWCast®

Como os resultados anteriores, obtidos com o *SolidCast®*, não são totalmente conclusivos quanto à possibilidade ou não de aparecimento rechupes nas peças, optou-se por realizar uma análise recorrendo ao *FLOWCast®*.

3.2.2.1. Velocidade do metal líquido

Na análise da velocidade do metal líquido, como referido no ponto 2.6.1.4 do capítulo 2, o fator velocidade tem um papel determinante na qualidade da peça. No entanto, procedeu-se a uma análise cuidadosa do comportamento da velocidade do fluido em vários pontos relativamente ao enchimento.

Análise na base do gito

Na análise do comportamento do fluido na base do gito, verificou-se que esta se encontra no intervalo $0.67m/s \leq v \leq 1.75m/s$. No entanto, o valor de aproximadamente 1.75m/s corresponde à fase inicial do enchimento, vindo a diminuir progressivamente, à medida que a moldação é cheia, até a uma velocidade mínima de 0.67m/s. Contudo, a velocidade média durante grande parte do enchimento é de 1.60m/s, como mostra a Figura 3.10.

Analisando o enchimento com recurso à representação vetorial, verificou-se que o escoamento é misto. Verifica-se turbulência no interior do metal com uma camada à superfície que apresenta fluido laminar, como tal, é um escoamento aceitável de acordo com o ponto 2.6.1.3 do capítulo 2 como se pode observar na Figura 3.11.

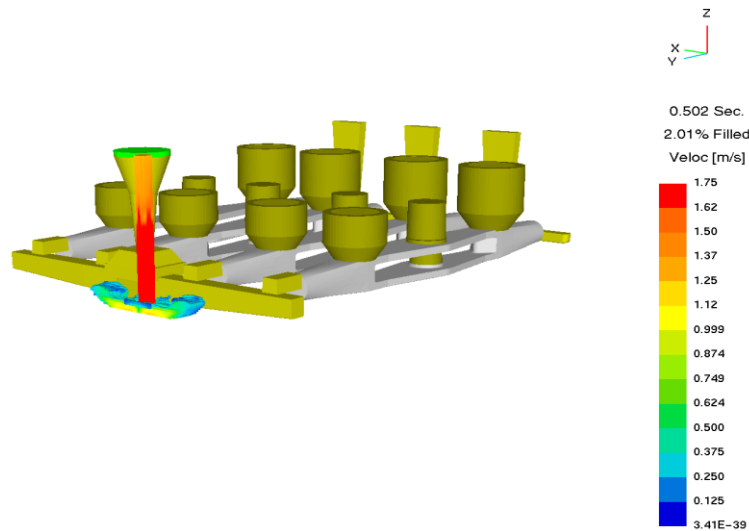


Figura 3.10 – Representação da formulação inicial, na análise da velocidade na base do gito.

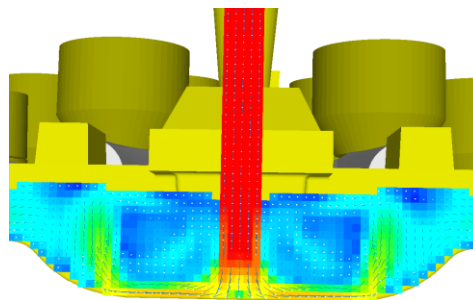


Figura 3.11 – Representação vectorial da velocidade na base do gito, na formulação inicial.

Análise nos canais

Na análise do comportamento do metal líquido nos canais, este chega à base do canal com uma velocidade aproximadamente de 0.65 m/s. Contudo, verifica-se que o metal líquido tem movimento retorno formando um regime turbilhonar e não permanecendo retido como seria desejável, ver Figura 3.12.

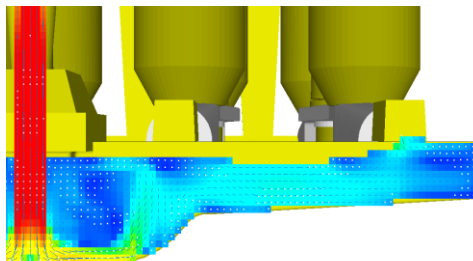


Figura 3.12– Representação da formulação inicial, na análise do comportamento do fluido nos canais.

Análise nos ataques

Na análise do comportamento do metal líquido nos ataques verifica-se que a velocidade está compreendida no intervalo de $0.20 \text{ m/s} \leq v \leq 0.60 \text{ m/s}$. Na fase inicial a velocidade do metal líquido é de aproximadamente 0.60 m/s até atingir a velocidade média de aproximadamente 0.50 m/s , vindo a diminuir progressivamente à medida que ocorre o enchimento da moldação, como mostra a Figura 3.13.

Como é referido no ponto 2.6.1.4 do capítulo 2, para escoamento se manter no regime laminar a velocidade ótima deverá ser 0.4 m/s . No caso em questão, para a velocidade de 0.60 m/s está-se perante um escoamento misto, verificando-se turbulência no interior do metal com uma camada à superfície que apresenta fluido laminar. Um escoamento com estas características é aceitável [22]. Como mostra a Figura 3.14.

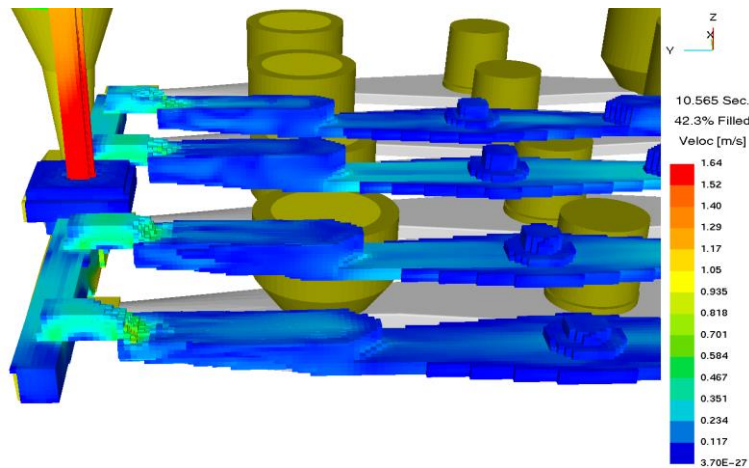


Figura 3.13 – Representação da formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.

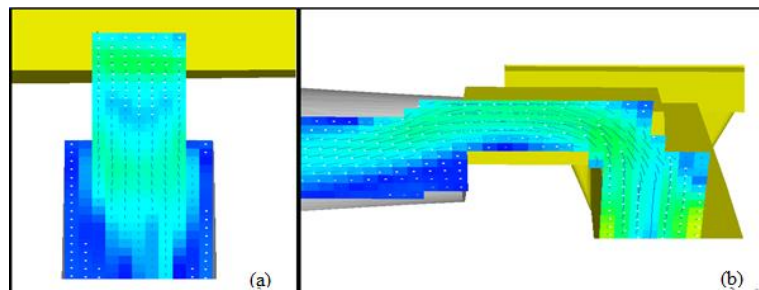


Figura 3.14 – Representação vectorial da velocidade nos ataques, na formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.

Análise do fluido na chegada à purga de escória.

Esta análise do comportamento do metal líquido é realizada quando atinge a região final da peça, lado oposto aos ataques, onde a velocidade é aproximadamente 0.34 m/s . Nas

peças centrais do cacho o fluido chega primeiro a essa região do que as peças mais afastadas do centro, como se pode ver na Figura 3.15.

Na análise do fluxo com recurso à representação vetorial, verifica-se que não há retorno do fluido na entrada da purga de escória, como mostra a Figura 3.16.

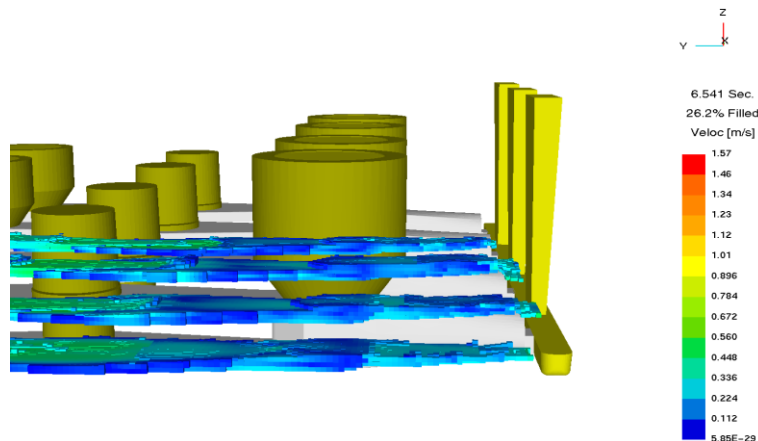


Figura 3.15 – Representação da análise da velocidade do primeiro metal na peça, na formulação inicial.

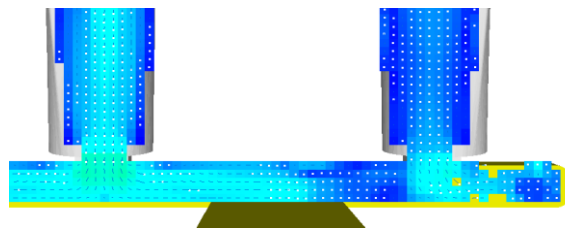


Figura 3.16 – Representação dos vetores velocidade no ataque da peça à purga de escória, na formulação inicial. Vista de cima.

3.2.2.2. Temperatura do metal líquido

Neste ponto realiza-se a análise da temperatura do metal líquido durante o enchimento. Para o efeito recorre-se à utilização da curva de arrefecimento do SOLIDCast para o material em questão.

A temperatura de vazamento é 1615°C e mantém-se líquido até aos 1505°C. Entre 1505°C até aos 1454°C tem-se duas fases, líquida e sólida, onde o ponto de fração crítica de sólido, ponto a partir do qual a liga já está suficientemente pastosa para que não haja fluxo de metal líquido dum as regiões da peça para outras, é 1482°C e a partir da temperatura de 1454°C encontra-se apenas a fase sólida.

No caso em estudo, a região mais crítica é a oposta aos ataques, pois quando o primeiro metal chega à purga de escória arrefece rapidamente. Por isso, é importante garantir o

arrefecimento do metal não comprometa o seu escoamento nos canais e interior das peças.

Como se pode observar na Figura 3.17, a temperatura nas duas peças situadas na zona central do cacho é de aproximadamente 1570°C. Este valor é aceitável pois a temperatura é suficientemente elevada para permitir que o metal se mantenha no estado líquido, garantindo, assim, que chegue a todas as regiões da moldação. Nas peças da extremidade do cacho, a temperatura é 1536°C, sendo também uma temperatura admissível uma vez que ainda se encontra com um valor superior ao ponto de fração crítica de sólido, 1482°C.

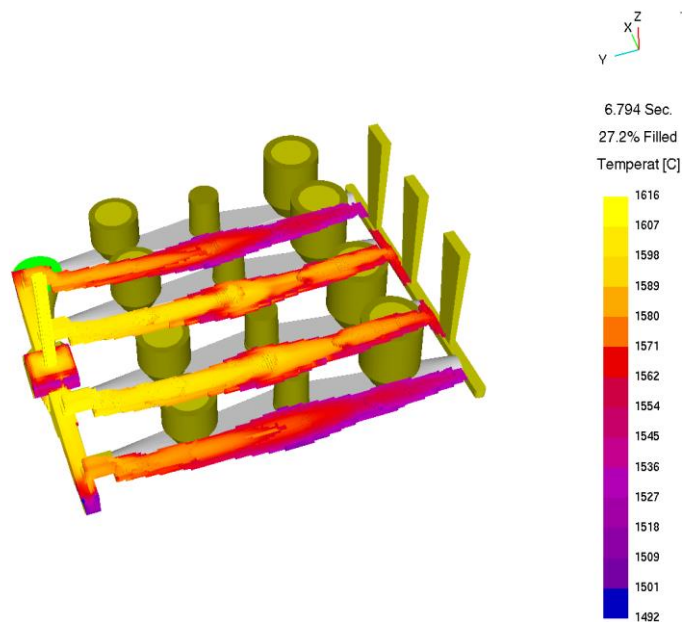


Figura 3.17 – Representação da temperatura na chegada do primeiro metal ao purgador de escória, na formulação inicial.

A partir da análise das simulações numéricas e de acordo com os resultados obtidos, conclui-se que, numa primeira observação, a formulação é adequada do ponto de vista da alimentação. No entanto, fazendo um estudo mais detalhado da solidificação recorrendo às etapas de análise do *SOLIDCast*®, verificou-se que esta ocorre de uma forma não direccionada. De acordo com critério de Niyama verifica-se a possibilidade de aparecimento de macroporosidade.

Para um estudo mais completo sucedeu-se uma análise em *FLOWCast*® com o objetivo de entender o comportamento do fluido durante o enchimento do cacho. Dessa análise, verificou-se que o enchimento é equilibrado e o fluido tem um bom comportamento a

nível de velocidades e escoamento no gito, canais, ataques e na chegada do fluido à purga de escória.

Após a análise detalhada da formulação inicial procederam-se a alguns testes como já referido, começando pelo estudo da temperatura de vazamento.

3.3. Simulação numérica do efeito da temperatura de vazamento

A opção de estudo da temperatura de vazamento deve-se à necessidade de verificar se é possível prever, através dos programas de simulação numérica, o comportamento da moldação com a alteração deste parâmetro. Na realidade, quando uma fusão é efectuada para várias moldações a temperatura de vazamento será diferente para todas elas, diminuindo à medida que o tempo vai passando, podendo ocorrer uma diminuição superior a 100°C se o número de moldações for significativo. Como tal, foi efectuada uma simulação com uma diminuição de 100°C na temperatura de vazamento relativamente à formulação inicial.

3.3.1. Simulação em SOLIDCast

Considerando os critérios referidos no ponto anterior pode verificar-se as seguintes observações:

Na formulação com a temperatura de vazamento inferior à formulação inicial, considerando os critérios tempo de solidificação, tempo de fração crítica do sólido e densidade do material, verificou-se um fenómeno igual à formulação inicial, isto é, com mais 100°C. Pois verifica-se que não existem zonas de metal isoladas por alimentar e apresenta também, um arrefecimento direccionado. Logo, pode-se concluir que não existe zonas com probabilidade de aparecimento de macroporosidade devido à contração do material no fundido.

No critério gradiente de temperatura, verificou-se que há uma diferença em relação à formulação com a temperatura mais elevada, verificando-se nas extremidades da peça um gradiente de temperatura mais baixo, mantendo o mesmo resultado a meio da peça, como mostra a Figura 3.18.

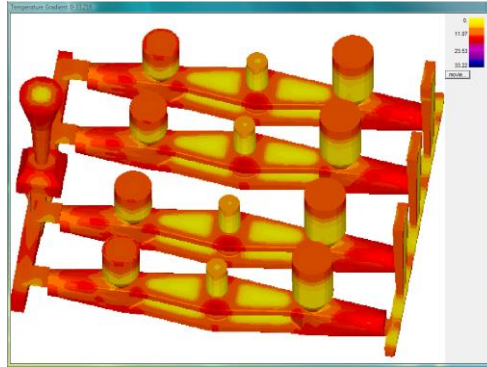


Figura 3.18 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise do critério gradiente da temperatura.

No critério velocidade de arrefecimento, verificou-se que as áreas que possuem uma estrutura do grão mais favorável nas peças são idênticas nas quatro peças do cacho, como mostra a Figura 3.19.

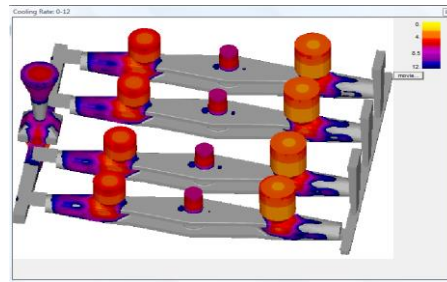


Figura 3.19 - Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise do critério velocidade de arrefecimento.

Na análise do critério de Niyama, ao contrário dos resultados obtidos na formulação com a temperatura mais elevada 100°C, verificou-se que não há qualquer indicação de macroporosidade.

Na análise do critério FCC, obteve-se como resultado um intervalo entre 0 e 3.16, sendo o valor crítico de 1.27. No entanto, com a análise no valor crítico verificou-se que existe possíveis indicações de microporosidade no interior das peças, como mostra na Figura 3.20.

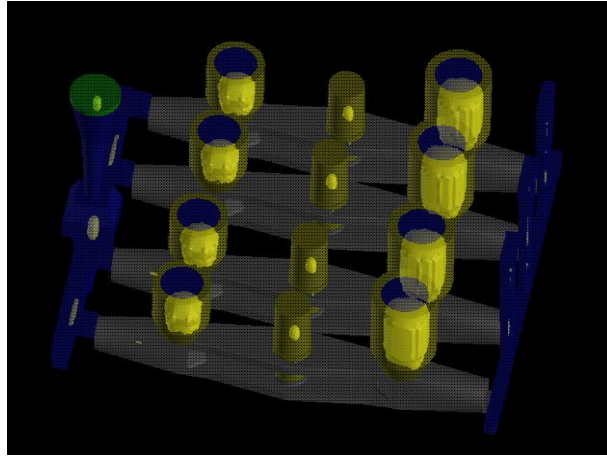


Figura 3.20 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise do critério FCC.

3.3.2. Simulação em FLOWCast

3.3.2.1. Velocidade do fluido

Análise na base do gito

Na análise do comportamento do fluido na base do gito, verificou-se, numa fase inicial do enchimento, que a velocidade encontra-se no intervalo $0.15\text{m/s} \leq v \leq 1.87\text{m/s}$. No entanto, o valor de aproximadamente 1.50m/s corresponde à fase inicial do enchimento, vindo a diminuir à medida que a moldação é cheia até à velocidade de 0.15m/s , com uma velocidade média durante grande parte do enchimento de 1.40m/s , como mostra a Figura 3.21.

Analisando o enchimento com recurso à representação vetorial, verificou-se que o escoamento é misto. Observa-se turbulência no interior do metal com uma camada à superfície que apresenta fluido laminar, como tal é um escoamento aceitável [22], como se pode ver na Figura 3.22.

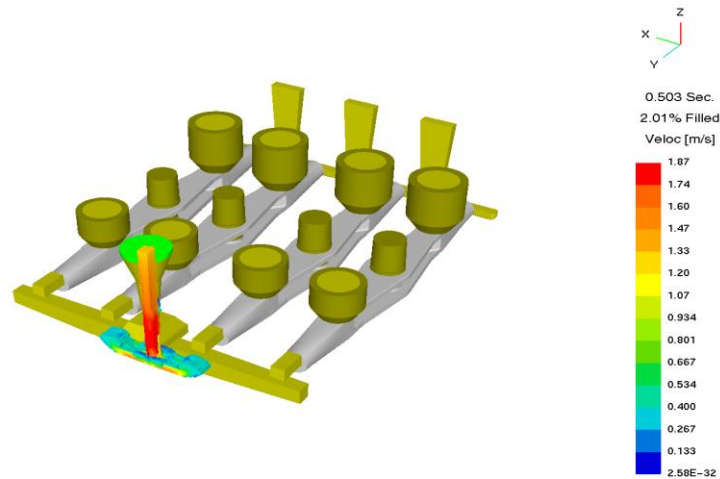


Figura 3.21 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise da velocidade na base do gito.

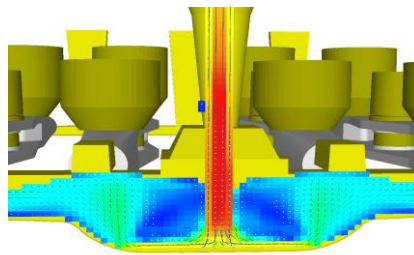


Figura 3.22 – Representação vectorial da velocidade na base do gito, na formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial.

Análise nos canais e nos ataques

Na análise do comportamento do metal líquido nos canais, verificou-se um comportamento semelhante à formulação inicial, ocorrendo apenas uma diminuição da velocidade quando o metal chega à ponta do canal sendo neste caso 0.55 m/s.

Na análise do comportamento do metal líquido nos ataques, verificou-se que a velocidade está compreendida no intervalo $0.20 \text{ m/s} \leq v \leq 0.60 \text{ m/s}$. Na fase inicial, a velocidade do fluido é aproximadamente 0.60m/s até atingir uma velocidade média de aproximadamente 0.45 m/s, vindo a diminuir conforme vai ocorrendo o enchimento da moldação, como mostra a Figura 3.23.

Como para o caso em análise a velocidade média é de aproximadamente 0.45 m/s então, de acordo com o número de Reynolds, o escoamento do metal é laminar. No entanto, analisando a Figura 3.24 pode verificar-se que ocorre turbulência em algumas regiões da moldação.

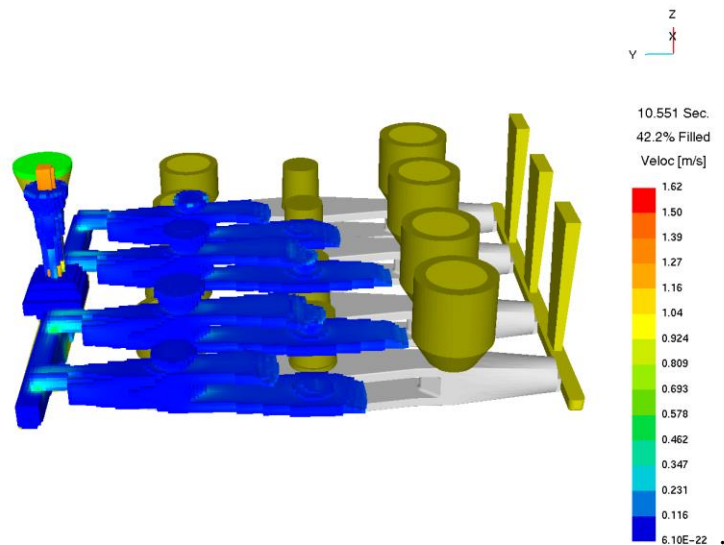


Figura 3.23 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.

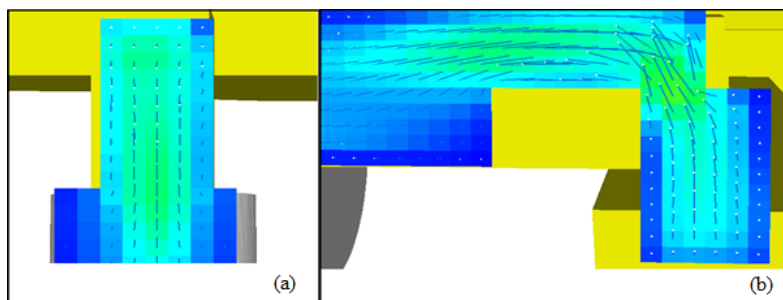


Figura 3.24 – Representação vectorial da velocidade nos ataques, na formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.

Análise do metal líquido na chegada à purga de escória.

Na análise do comportamento do metal líquido na chegada à purga de escória, momento em que este atinge secção final da peça, lado oposto aos ataques, a velocidade é aproximadamente 0.11m/s. Verificando-se que o metal chega mais cedo a essas regiões nas peças centrais, como se pode ver na Figura 3.25. Com os resultados obtidos pode-se concluir que existe uma má fluidez do metal, uma vez que quando chega à purga de escória a velocidade é muito reduzida. Assim, o enchimento não ocorre de forma ideal, uma vez que partes superiores da peça já estão cheias antes do metal chegar à purga de escória este fenómeno deve-se, essencialmente, à má fluidez do metal.

Na análise do fluxo com recurso à representação vectorial com esta formulação, não se verifica um retorno do fluido na entrada do mesmo na purga de escória devido à má fluidez do metal, como já foi referido anteriormente.

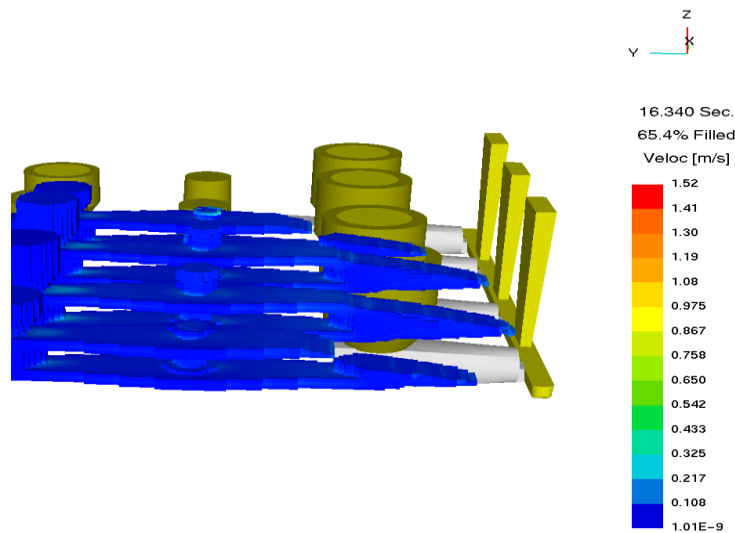


Figura 3.25 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise da velocidade do primeiro metal na peça.

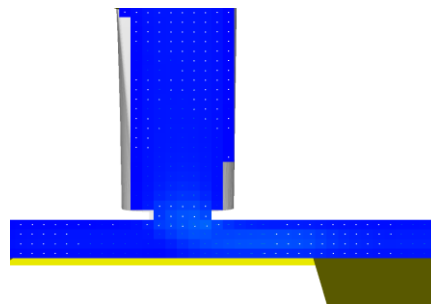


Figura 3.26 – Representação da formulação com a temperatura de vazamento inferior em relação à formulação inicial, na análise vectorial da velocidade no ataque da peça à purga de escória, vista de cima.

3.3.2.2. Temperatura do metal líquido

Na análise da temperatura do metal líquido, verifica-se que na chegada do fluido à purga de escória, a temperatura é de aproximadamente 1498°C, como se pode ver na Figura 3.27. Esta temperatura é muito baixa, encontrando-se perto da temperatura de 1482 °C, ponto de fração crítica, logo, o fluido já se encontra num estado pastoso tendo dificuldades em fluir.

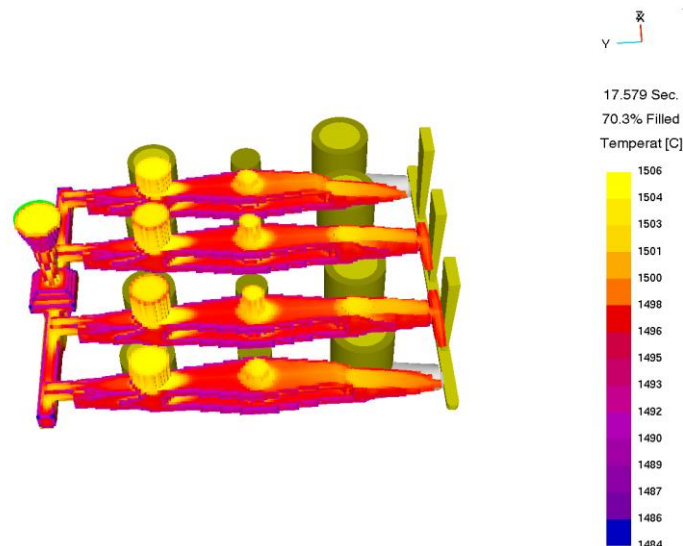


Figura 3.27 – Representação da temperatura na chegada do primeiro metal ao purgador de escória, no cacho com a temperatura de vazamento alterada.

Segundo a análise dos resultados nesta formulação conclui-se que no *SOLIDCast*® não se obteve os resultados previstos para a solidificação com a alteração do parâmetro temperatura de vazamento.

Nos resultados da simulação de enchimento no *FLOWCast*® o comportamento do metal líquido estava de acordo com o previsto. Neste caso, verificou-se uma reduzida fluidez do metal devido à baixa temperatura com que este é vazado. Como consequência, a velocidade do escoamento foi mais lenta porque o metal encontra-se num estado pastoso. Contudo, verificou-se um fenómeno que não era previsível, o facto de o enchimento ter preenchido toda a cavidade da moldação. Na realidade, provavelmente aconteceria que a moldação não ficaria completamente cheia, pois o estado pastoso do material impediria o enchimento de algumas cavidades da moldação.

No entanto, como na análise da solidificação o *SOLIDCast*® considera a forma como decorre o enchimento da moldação, os resultados obtidos na simulação deveriam ter previsto peças com muitos defeitos, como macroporosidade e microporosidade. Contudo, tal não aconteceu e da simulação da solidificação resultou uma previsão de solidificação bem direccionada e a inexistência de macroporosidade e microporosidade.

Uma conclusão essencial a tirar neste estudo é a de que não é suficiente utilizar estes programas de simulação numérica para apoio ao projecto sem conhecimento prévio do processo de fabrico. É necessário uma experiência prática do processo de fabrico para permitir realizar uma análise crítica aos resultados obtidos na simulação.

3.3.3. Estudo do ponto crítico da temperatura de vazamento

Da análise do ponto anterior verificou-se que para uma temperatura inferior em 100 °C relativamente à formulação inicial ocorria o aparecimento de defeitos do tipo macro e microporosidades. No sentido de verificar qual o ponto crítico, a partir do qual começam a surgir esses defeitos realizou-se uma análise em alguns pontos ao longo da peça, tais como, base do gito, ataques, meio da peça, ponta da peça (lado oposto aos ataques) e ponta da purga de escória, em que se irá diminuir a temperatura de 20 em 20 °C desde a temperatura de vazamento inicial.

Na base do gito foi analisado a velocidade de escoamento do fluido para diferentes temperaturas. Na Figura 3.28, pode-se observar que ocorre uma diminuição elevada da velocidade num intervalo de temperaturas de 1610 °C e 1540 °C. Para valores inferiores de temperatura a velocidade mantém aproximadamente constante em torno dos 1,40 m/s.

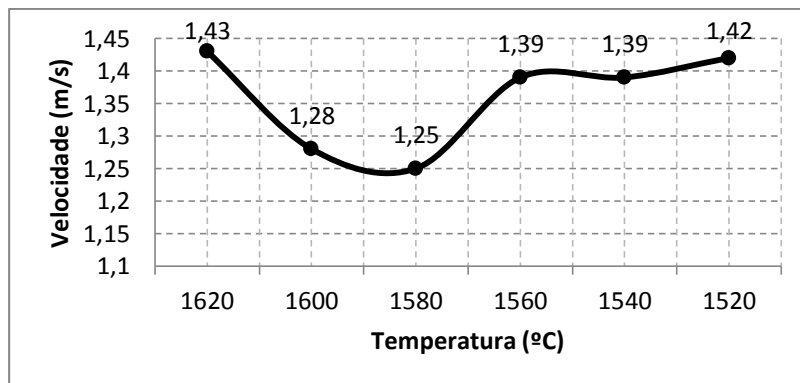


Figura 3.28 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal na base do gito.

No estudo dos ataques fizeram-se duas análises distintas: Velocidade do metal líquido e o tempo de chegada para diferentes temperaturas. Na Figura 3.29, pode verificar-se que a velocidade mantém-se aproximadamente constante em torno dos 0,25 m/s, tendo um valor mínimo de 0,18 m/s para uma temperatura de 1540 °C. Na Figura 3.30, pode observar-se que o tempo de chegada do metal líquido passou de um valor 2 s para 1620 °C para cerca de 2,3 s para a temperatura de 1600 °C e mantendo-se constante para as restantes temperaturas analisadas.

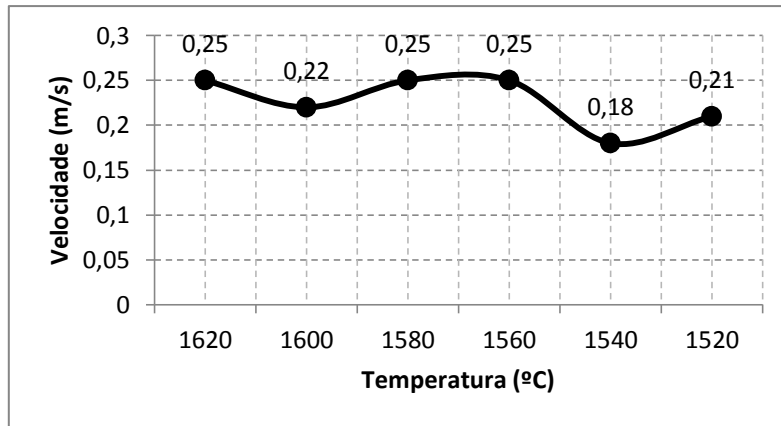


Figura 3.29 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal nos ataques.

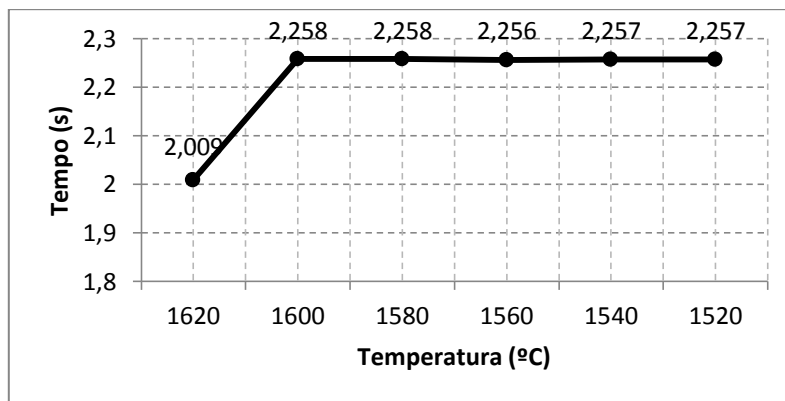


Figura 3.30 – Gráfico do tempo que o metal demora a atingir os ataques em diferentes temperaturas.

Analisando a região central da peça, verificou-se que a velocidade é aproximadamente constante ($\approx 0,33$ m/s) até 1560 °C, onde ocorre um decréscimo significativo atingindo um valor de $0,01$ m/s para uma temperatura de 1520 °C, como se pode observar na Figura 3.31. Na Figura 3.32, verifica-se que o tempo de chegada à região central é praticamente constante até 1540 °C, cerca de 4 s, para temperaturas inferiores o tempo de chegada sobe para 7 s.

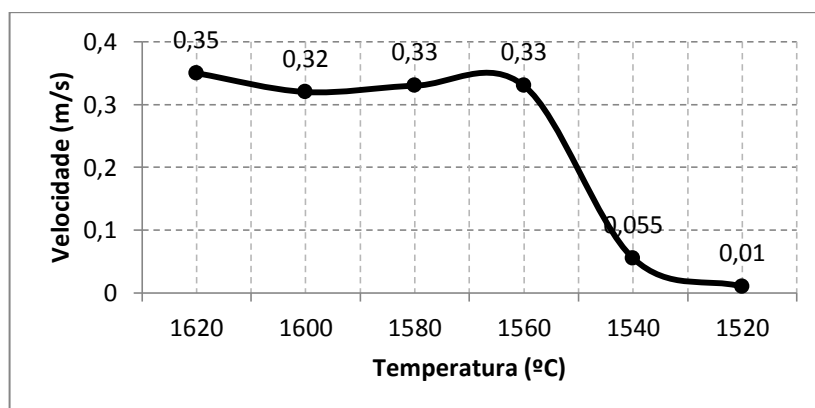


Figura 3.31 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal a meio da peça.

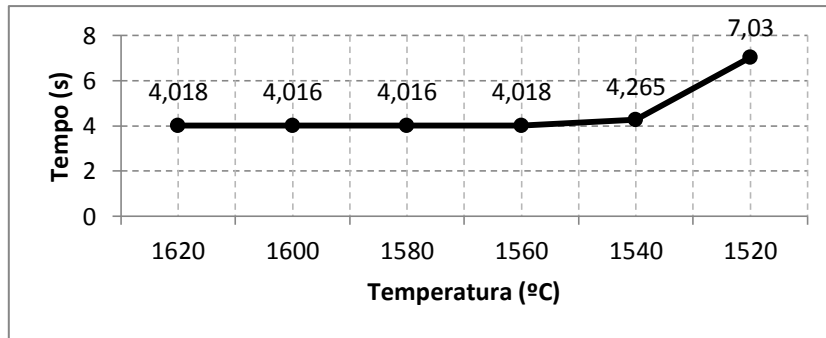


Figura 3.32 - Gráfico do tempo que o metal demora a atingir o meio da peça em diferentes temperaturas.

Na chegada à ponta da peça, no lado oposto aos ataques, verifica-se que a velocidade decresce ligeiramente até à temperatura de 1560 °C, passando de 0.25 m/s para 0.20 m/s. Contudo, de 1560 °C para 1540 °C há um decréscimo da velocidade para 0.04 m/s, como se pode ver na Figura 3.33. Relativamente ao tempo de chegada pode observar-se na Figura 3.34 que este se mantém constante em 6 s até uma temperatura de 1560 °C. A partir desse valor há um acréscimo acentuado, podendo atingir os 17 s para 1520 °C.

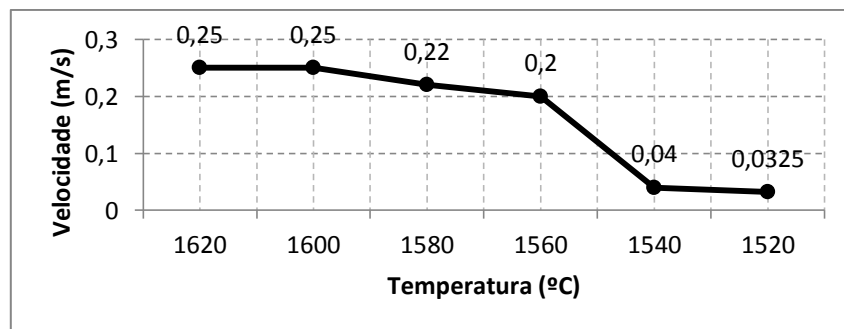


Figura 3.33 - Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal na ponta da peça.

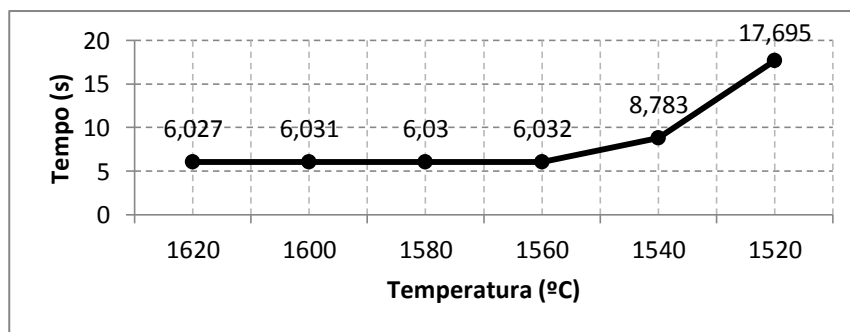


Figura 3.34 - Gráfico do tempo que o metal demora a atingir a ponta da peça em diferentes temperaturas.

Na ponta da purga de escória pode observar-se que as velocidades são bastantes baixas comparativamente com outras regiões da peça. Na Figura 3.35 pode analisar-se que a velocidade sofre um decréscimo entre 1600 °C e 1520 °C, passando de 0.08 m/s para 0.01 m/s, respetivamente. No que concerne ao tempo de chegada do metal líquido à

ponta da purga de escória verifica-se que este é aproximadamente constante em torno dos 25s, como se pode ver na Figura 3.36.

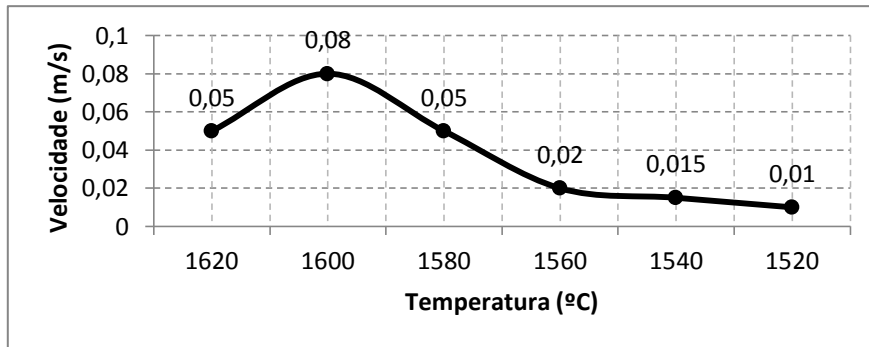


Figura 3.35 – Gráfico da velocidade em função de diferentes temperaturas do metal na ponta da purga de escória.

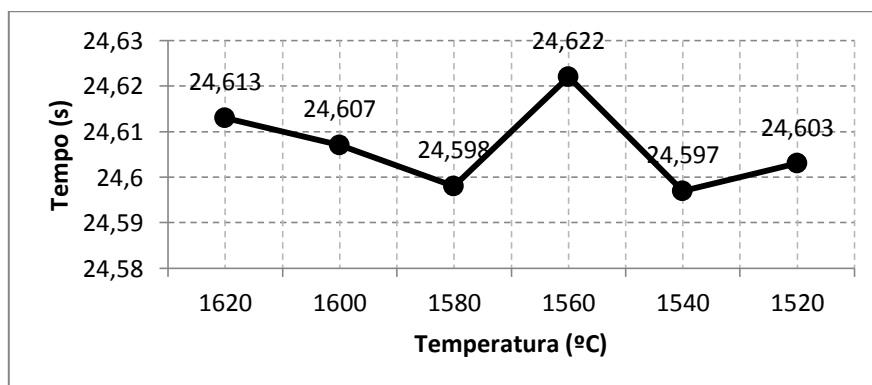


Figura 3.36 – Gráfico do tempo que o metal demora a atingir a purga de escória em diferentes temperaturas.

Um estudo interessante nesta fase de trabalho seria comparar as curvas analisadas neste ponto e tirar algumas conclusões genéricas. Na Figura 3.37 compararam-se as velocidades do metal líquido em função da temperatura para diferentes regiões da peça. A partir da observação destas curvas pode verificar-se que ocorre uma grande variação de comportamento relativamente à velocidade quando se passa da temperatura 1560 °C para 1540 °C, podendo-se, deste modo, concluir que o ponto crítico ocorre entre estas duas temperaturas.

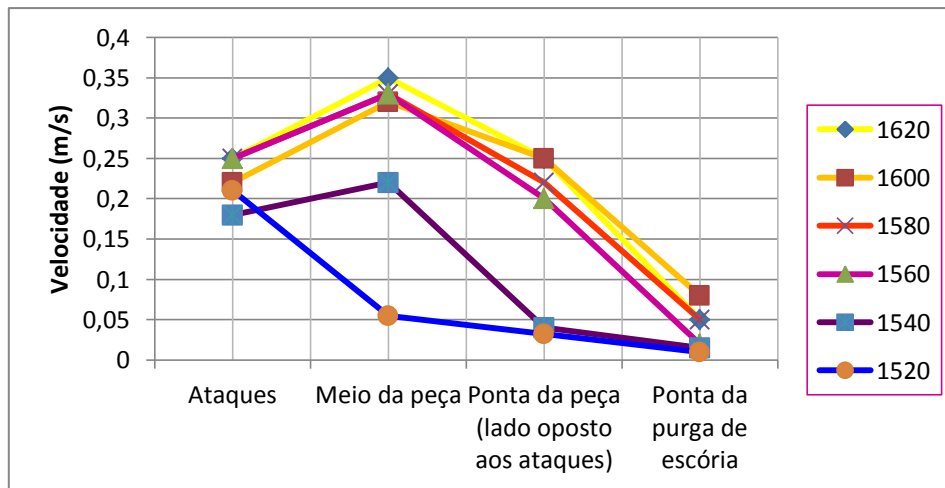


Figura 3.37 - Comportamento da velocidade, em diferentes temperaturas, ao longo da peça.

3.4. Simulação numérica do efeito do sistema de gitagem

Com objectivo de avaliar o efeito do sistema de gitagem para o aparecimento de defeitos em peças de fundição realizaram-se simulações em que se utilizaram diferentes valores para este parâmetro. Neste sentido, desenvolveram-se simulações numéricas considerando a alteração do posicionamento das peças em relação ao sistema de gitagem, passando a ser atacadas pelas duas extremidades. Uma outra análise na alteração do sistema de gitagem, foi a utilização de diferentes áreas da secção característica nos ataques à peça.

3.4.1. Ataques nas duas extremidades

3.4.1.1. Simulação em SOLIDCast®

Na formulação com o ataque nas duas extremidades das peças, fez-se a mesma análise que em pontos anteriores, considerando as etapas de análise do *SOLIDCast*®. Na sequência de diferentes critérios de análise verificou-se que no critério da densidade, ocorre o aparecimento de macroporosidade na zona dos ataques à peça, devido à contração do material no fundido, como se pode ver na Figura 3.38. Como consequência dos resultados observados pode concluir-se que esta proposta de alteração à formulação inicial, que tinha um ataque por peça, não é viável por ser mais propícia à formação de macroporosidade.

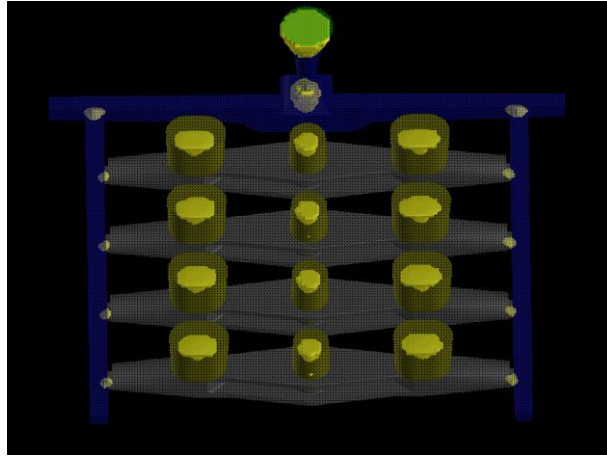


Figura 3.38 – Representação da formulação com gitagem diferente da formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.

3.4.1.2. Simulação em FLOWCast®

Depois de verificar os maus resultados na análise da densidade, foi estudado o enchimento da moldação, com o objectivo de analisar o comportamento do fluido durante o enchimento.

Como cada peça é atacada em dois pontos opostos, o metal líquido chega a meio da peça vindo de duas direcções opostas, ocorrendo um choque entre o metal líquido, ocorrendo por isso uma forte turbulência (Figura 3.39), pois a sua velocidade pode atingir 0.55 m/s. Este efeito é mais notório nas peças que estão mais distantes do gito, como se pode ver na Figura 3.40.

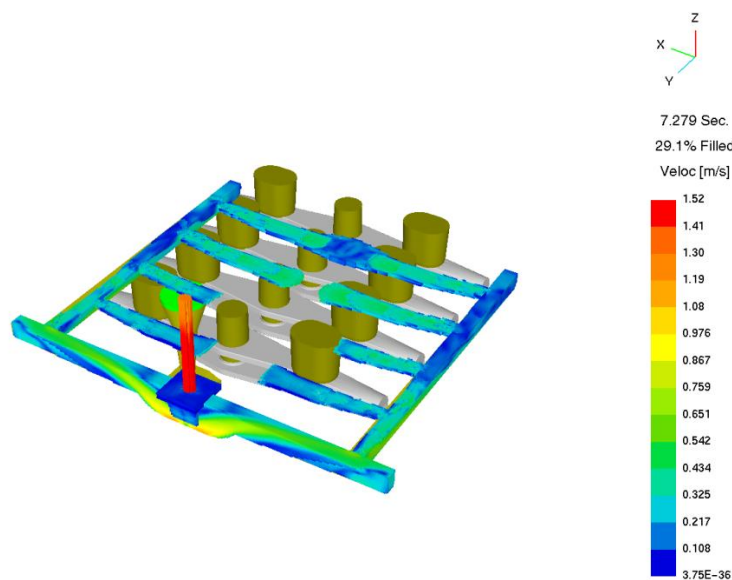


Figura 3.39 – Representação da formulação com gitagem diferente da formulação inicial, na análise da velocidade onde o primeiro metal se encontra no centro das peças.

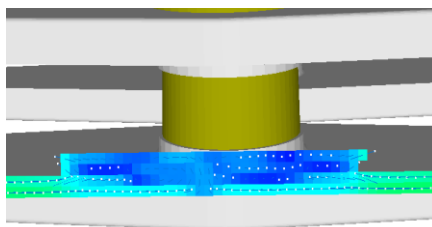


Figura 3.40 – Representação da formulação com gitagem diferente da formulação inicial, na análise dos vetorial da velocidade no centro das peças no ponto de encontro do metal.

3.4.2. Secção característica dos ataques duas vezes maior que a formulação inicial

3.4.2.1. Simulação em SOLIDCast®

Na análise da formulação com a área dos ataques duas vezes maior que a formulação inicial, verificou-se o mesmo fenómeno que a formulação anterior, em que as peças são atacadas pelas duas extremidades, reprovando no critério da densidade e do enchimento.

Na análise do critério densidade, verificou-se a existência de macroporosidade na zona dos ataques das peças centrais, relativamente ao cacho. Este fenómeno ocorre devido à contração do material no fundido, como mostra Figura 3.41. Para minimizar o aparecimento da macroporosidade nos ataques é necessário a utilização de um alimentador nessa região.

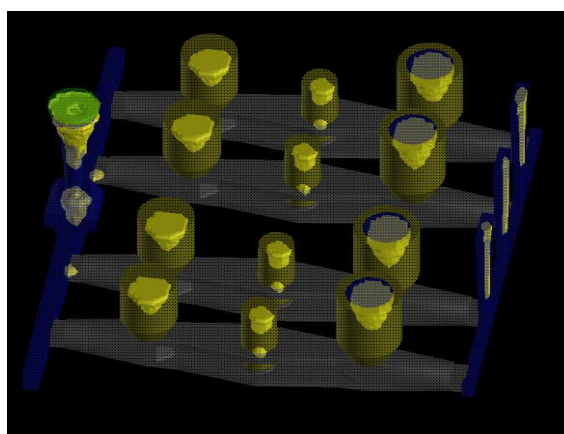


Figura 3.41 – Representação da formulação com a área dos ataques duas vezes maior que na formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.

3.4.2.2. Simulação em FLOWCast

Na análise da Figura 3.43 verifica-se que ocorre um escoamento laminar, no entanto a velocidade é baixa devido à área dos ataques ser muito grande. No caso de estudo, pode

concluir-se que o aumento da área nos ataques não diminui a probabilidade da ocorrência de rechupes.

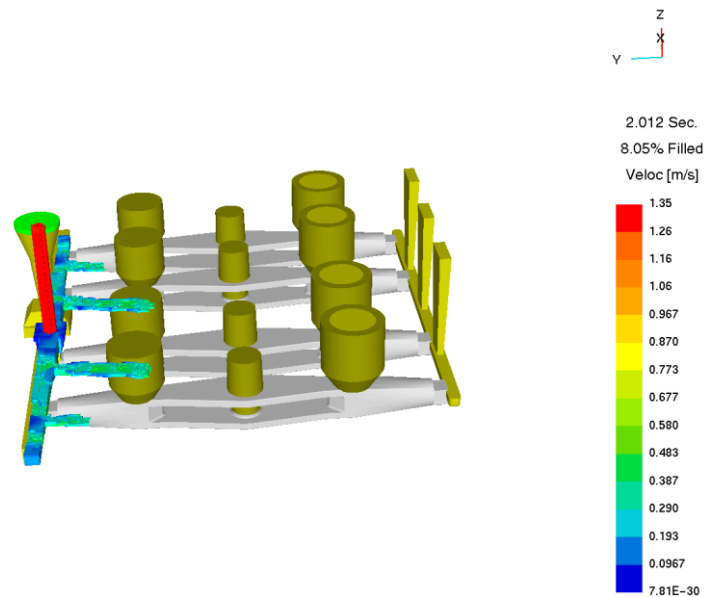


Figura 3.42– Análise do enchimento na formulação com a área dos ataques duas vezes maior que a formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.

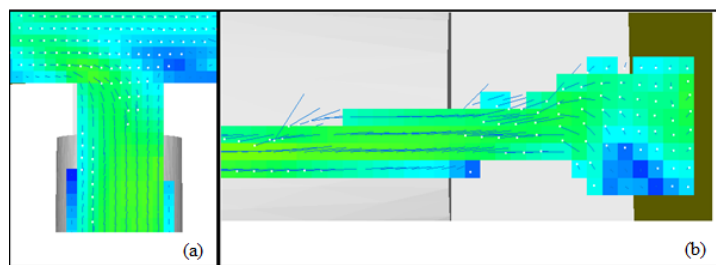


Figura 3.43 – Representação da análise dos vetores velocidade nos ataques, na formulação com a área dos ataques duas vezes maior que a formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.

3.4.3. Secção característica dos ataques duas vezes menor que a formulação inicial

3.4.3.1. Simulação em SOLIDCast®

Na análise da formulação com a secção característica dos ataques duas vezes menor que a formulação inicial, verificou-se um desempenho superior à formulação inicial, visto que não se observam regiões de metal isoladas por alimentar e apresentam um arrefecimento direcionado.

3.4.3.2. Simulação em FLOWCast®

Na análise do comportamento do metal líquido, durante o enchimento, verificou-se que a velocidade está compreendida num intervalo de $0.20 \text{ m/s} \leq v \leq 0.75 \text{ m/s}$. Na fase inicial a velocidade do fluido é aproximadamente 0.75 m/s , diminuindo ao longo do enchimento até atingir a velocidade média de aproximadamente 0.70 m/s , como mostra a Figura 3.44. Para a velocidade de 0.70 m/s o escoamento é misto, verificando-se turbulência no interior do metal com uma camada à superfície que apresenta escoamento laminar, como mostra a Figura 3.45.

Nesta análise verifica-se que o metal flui com uma velocidade elevada, devido à dimensão reduzida dos ataques, podendo causar erosão na moldação. No entanto com esta simulação verificou-se que a redução dos ataques, no problema em questão, pode melhorar, desde que não seja uma redução muito elevada.

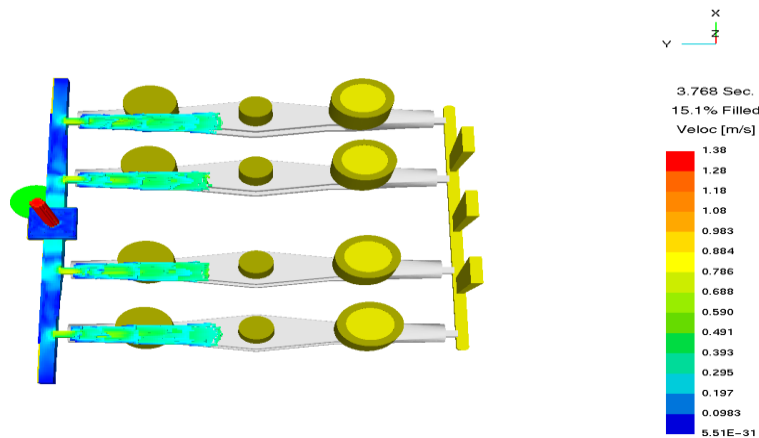


Figura 3.44- Representação da formulação com a área dos ataques duas vezes menor que a formulação inicial, na análise da velocidade nos ataques.

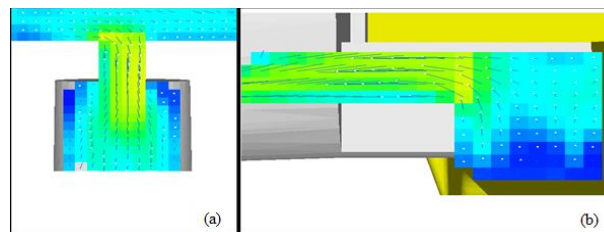


Figura 3.45 – Representação da análise vectorial da velocidade nos ataques, na formulação com a área dos ataques duas vezes menor que na formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.

3.5. Simulação numérica do efeito do tempo de enchimento

3.5.1. Simulação em SOLIDCast®

Na análise do parâmetro tempo de enchimento foram efectuadas duas simulações, com o tempo de enchimento superior e inferior à formulação inicial. O tempo de enchimento pode ser determinado com recurso a uma ferramenta de cálculo integrada no *SOLIDCast®* e designada por *Gating Design Wizard*. Este parâmetro é de grande relevância para os resultados obtidos nas simulações numéricas, pois quanto menor for o tempo de enchimento, maior a velocidade do fluido e vice-versa, podendo induzir em erro o utilizador com os resultados obtidos na utilização de um tempo não adequado.

Na análise das simulações, verificou-se que o *SOLIDCast®* tem em conta o tempo de enchimento, uma vez que se obteve resultados diferentes para tempos de enchimento distintos.

Na simulação com o tempo de enchimento maior que a formulação inicial, na análise da solidificação verificou-se o aparecimento de macroporosidade, na análise do critério densidade, nos ataques e numa região próxima dos alimentadores, como mostra a Figura 3.46. Com o critério de Niyama verificou-se macroporosidades na região central da peça, como mostra a Figura 3.47.

Na simulação com o tempo de enchimento inferior que na formulação inicial verificou-se uma boa sanidade das peças.

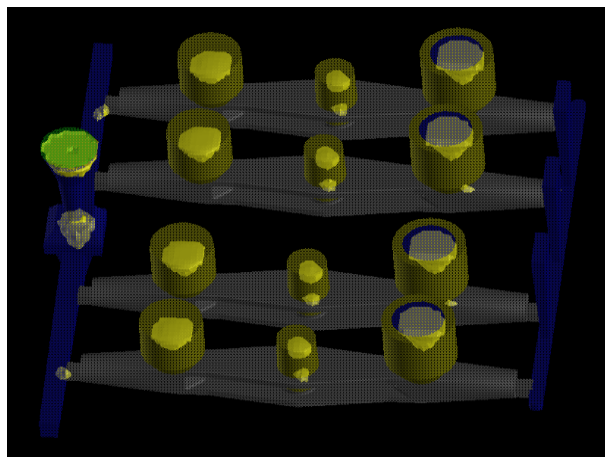


Figura 3.46– Representação da formulação com o parâmetro tempo de enchimento superior à formulação inicial, na análise do critério densidade, com valor igual a 1 (um), 100% sólido, 0% porosidade.

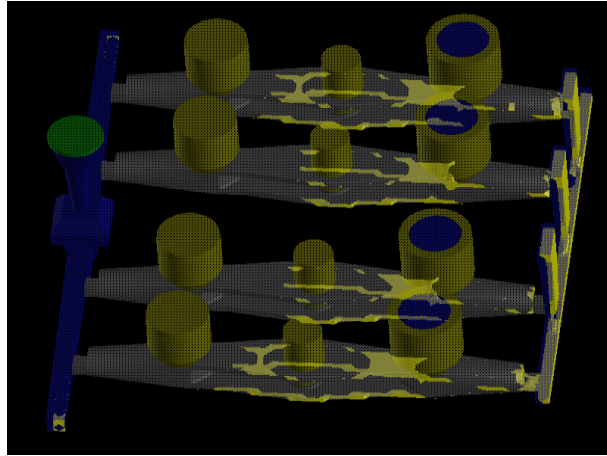


Figura 3.47– Representação da formulação com o parâmetro tempo de enchimento superior em relação à formulação inicial, na análise do critério de Niyama, com valor de análise igual a 0 (zero).

3.5.2. Simulação em FLOWCast®

Na análise do enchimento com o *FLOWCast*®, considerando o tempo de enchimento maior que na formulação inicial, verificou-se um escoamento laminar, como mostra a Figura 3.48. Neste caso, verificou-se uma diferença relativamente à formulação inicial, que tinha um escoamento misto, este tipo de escoamento deveu-se ao facto da velocidade ser inferior a esta análise. Na simulação com tempo de enchimento menor que na formulação inicial, acontece o contrário, o escoamento é misto, como mostra a Figura 3.49, tal como na formulação inicial, devido à velocidade do fluido ser elevada uma vez que o tempo de enchimento é muito baixo para a dimensão do cacho em questão, logo existe maior turbulência. Quanto à fluidez é aceitável uma vez que o enchimento é feito de forma rápida mantendo um intervalo de temperatura elevado.

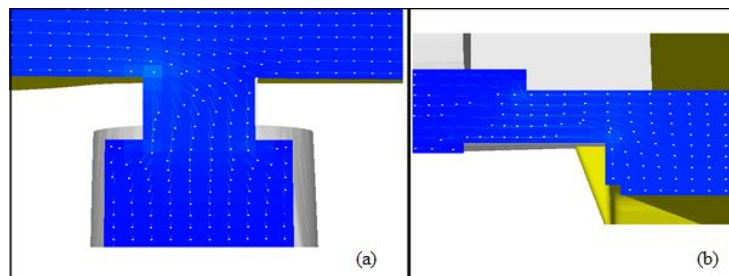


Figura 3.48– Representação da análise vetorial da velocidade nos ataques, na formulação com o parâmetro tempo de enchimento superior à formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.

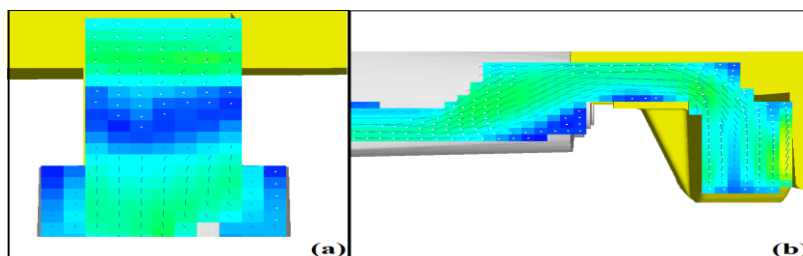


Figura 3.49 – Representação da análise vectorial da velocidade nos ataques, na formulação com o parâmetro tempo de enchimento inferior à formulação inicial. Em (a) vista de cima e em (b) vista lateral.

Contudo, com a análise de ambas simulações do parâmetro tempo de enchimento verifica-se que é um parâmetro relevante nos programas de simulação numérica utilizados neste trabalho. Para obter resultados mais próximos da realidade deve-se utilizar um tempo de enchimento o mais realista possível, de modo a este parâmetro não influenciar nos resultados.

Capítulo 4

4. Conclusões e propostas de trabalhos futuros

4.1. Conclusão

Com a análise dos resultados nos Softwares *SOLIDCast*® e *FLOWCast*®, de um modo geral, pode-se afirmar que os parâmetros e formulações da fundição influenciam de forma muito notória os resultados obtidos.

Para uma análise mais aprofundada do processo de fabrico de fundição é necessário o recurso aos dois programas numéricos referidos, pois a informação dada pelos dois é distinta e complementar. O *SOLIDCast*® faz uma avaliação da solidificação do metal na moldação, enquanto que, o *FLOWCast*® estuda o escoamento do fluido nos canais da moldação, permitindo visualizar o comportamento do fluido durante o enchimento representando a sua velocidade e temperatura.

Para se tirarem conclusões satisfatórias das simulações realizadas com o *SOLIDCast*® é necessária avaliar os resultados de acordo com os diferentes critérios integrados neste programa. Verificou-se que é necessário fazer uma cuidada análise dos diferentes critérios, no caso de estudo apresentado neste trabalho, verificou-se que alguns critérios dão informações contraditórias. Um exemplo disso encontra-se na análise dos resultados da simulação para a formulação inicial, de acordo com alguns critérios, os resultados indicavam para uma solidificação direcionada, um bom desempenho por parte do sistema de alimentação e gitagem. No entanto, fazendo uma avaliação com recurso a outros critérios do programa, verificou-se que a solidificação poderá não ser tão direcionada como era previsto anteriormente.

Da análise dos resultados para formulação inicial pode conclui-se que, apesar de aparentemente parecer uma formulação bem projetada no ponto de vista da alimentação, no entanto, verificou-se que ocorre uma solidificação mal direcionada na alimentação, pois verifica-se, de acordo com o critério de Niyama, a ocorrência de macroporosidade pode estar na origem dos rechupes verificados na peça real.

Para uma análise complementar recorreu-se ao *FLOWCast*® para avaliar o comportamento do fluido no enchimento do cacho. Desta análise, verificou-se que o

enchimento é equilibrado e o metal líquido tem um escoamento misto, o que é aceitável para este processo de fabrico. Este comportamento é semelhante nas várias regiões do cacho: gito, canais, ataques, peça e purga de escória, logo o problema não estará associado à gitage.

O fator que mais chamou à atenção e que provavelmente poderá estar na origem do problema é o fator da temperatura de vazamento, associado à quantidade de moldações a vazarem. A temperatura de vazamento não é igual em todas as moldações, pois ocorre uma diminuição da temperatura do metal na colher de vazamento que poderá ser, no caso de um número significativo de moldações de menos 100°C. Realizando uma nova simulação diminuindo 100 °C na temperatura de vazamento, verificou-se que o *SOLIDCast*® não detetou qualquer alteração de comportamento na solidificação do metal na moldação. Contudo, no *FLOWCast*® observou-se que é visível a má fluidez do metal devido ao estado pastoso que se encontra provocado pela baixa temperatura com que este é vazado.

Considerando o caso real em estudo, pode afirmar-se, com algum grau de certeza, que a possível causa dos defeitos aleatórios que surgem na peça final, possa estar associada com temperatura de vazamento. Como uma colher de vazamento permite o enchimento de várias moldações, nas últimas a receberem o metal líquido, este encontra-se a uma temperatura bem inferior às primeiras, por isso é plausível pensar que para estas temperaturas inferiores o metal se encontre num estado mais pastoso e impeça que os alimentadores sejam suficientemente eficientes para impedir o aparecimento do rechupe em algumas regiões da peça.

Do estudo realizado neste trabalho pode concluir-se que os programas *SOLIDCast*® e *FLOWCast*® permitem prever potenciais defeitos que possam ocorrer nas peças e corrigi-los procurando utilizar os parâmetros e formulação do fundido mais adequados para cada caso particular. Contudo, estes meios não poderão ser utilizados de uma forma otimizada se não houver uma forte experiência teórica e prática do utilizador sobre o processo de fabrico de fundição.

No âmbito deste trabalho foram efectuados um resumo e uma apresentação no congresso primeiro encontro de jovens investigadores no Instituto politécnico de Bragança como se pode ver no Anexo 4.

4.2. Propostas de melhorias

Uma vez que com a análise dos programas foram detetadas algumas limitações, seria interessante fazer um estudo mais aprofundado com o objetivo de quantificar algumas dessas limitações e propor alterações com o intuito de as resolver.

Relativamente ao caso em estudo propõe-se as seguintes alterações como o objetivo de corrigir ou reduzir o aparecimento dos defeitos nas peças:

1. Reduzir o número de peças por cacho de forma a processar o enchimento de uma forma mais rápida, para que não ocorra grandes diminuições da temperatura de vazamento de uma moldação para outra, melhorando também o processo de enchimento para uma forma mais equilibrada.
2. Efetuar fusões em pequenas quantidades, por exemplo 500Kg por fusão, de modo que não haja grandes diminuições da temperatura do metal na colher de vazamento até ao fim do vazamento. É preferível executar duas fusões de 500Kg cada, em vez de uma só de 1000kg, por exemplo.

Bibliografia

- [1] J. M. d. C. Ferreira, *Tecnologia da Fundição*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [2] M. Flemings, “Solidification processing,” em *Metallurgical Transactions*, Nr 10 ed., vol. 5, 1974, pp. 2121-2134.
- [3] T. Clyne, M. Wolf e W. Kurz, “The effect of melt composition on solidification cracking of steel, with particular reference to continuous casting,” em *Metallurgical Transactions B*, Nr 2 ed., vol. 13, 1982, pp. 259-266.
- [4] D. Stefanescu, G. Upadhyay e D. Bandyopadhyay, “Heat transfer-solidification kinetics modelling of solidification of castings,” em *Metallurgical Transactions A*, Nr 3 ed., vol. 21, 1990, pp. 997-1005.
- [5] M. E. Glicksman, “Principles of Solidification An Introduction to Modern Casting and Crystal Growth Concepts,” em *Springer Science+Business Media*, New York, 2011.
- [6] “Automotive Manufacturing in Georgia: Community and Economic Development,” em *Georgia Power Report*, 2011.
- [7] C. Raub e D. Ott, “Gold Bulletin,” em *Gold casting alloys*, Nr 2 ed., vol. 16, 1983, pp. 46-51.
- [8] “FWC Sector Competitiveness Studies - Competitiveness of the EU Metalworking and Metal Articles Industries,” em *Final Report of European Commission*, 2009.
- [9] “ASM Metals Handbook - Casting,” 9th Edition Metals Handbook ed., vol. 15, 1992.
- [10] C. Ammen, “The complete handbook of sand casting,” New York, McGraw Hill, 1979.
- [11] E. Degarmo, J. Black e R. Kohser, “Materials and Processes in Manufacturing,” 9th ed ed., Canada, John Wiley and Sons, 2003.

- [12] W. Bonilla, S. Masood, e P. Iovenitti, “An Investigation of Wax Patterns for Accuracy Improvement in Investment Cast Parts,” em *The International Journal of Advanced Manufacturing Tecnology*, Nr 5 ed., vol. 18, 2001, pp. 348-356.
- [13] J. Campbell, “Castings Practice - The 10 Rules of Castings,” Burlington, Elsevier Butterworth - Heinemann, 2004.
- [14] B. Cantor e K. O'Reilly, Edits., “Solidification and Casting,” Bristol and Philadelphia, 2003.
- [15] K. Kubo e R. Pehlke, “Mathematical modeling of porosity formation in solidification,” em *Metallurgical Transactions B*, Nr 2 ed., vol. 16, 1985, pp. 359-366.
- [16] A. Bernard, J. Delplace, N. Perry e S. Gabriel, “Integration of CAD and rapid manufacturing for sand casting optimisation,” em *Rapid Prototyping Journal*, Nr 5 ed., vol. 9, 2003, pp. 327-333.
- [17] A. Dahle, Y. Lee, M. Nave, P. Schaffer e D. StJohn, “Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys,” em *Journal of Light Metals*, Nr 1 ed., vol. 1, 2001, pp. 61-72.
- [18] P. Lee , A. Chirazi, R. Atwood e W. Wang, “Multiscale modelling of solidification microstructures, including microsegregation and microporosity, in an AL-SI-Cu alloy,” em *Materials Science and Engineering A*, Nr 1-2 ed., vol. 365, 2004, pp. 57-65.
- [19] S. Sulaiman e A. Hamouda, “Modelling and experimental investigation of solidification process in sand casting,” em *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, pp. 1723-1726.
- [20] H. Hong-jun, Y. Ming-bo, L. Jing, W. Chun-huan e C. Kang, “Aplication of the software ProCAST in the casting of solidification simulation,” em *Materials Science and Technology*, vol. 3, 2006.

- [21] M. Haque e M. Maleque, “Effect of process variables on structure and properties of aluminium-silicon piston alloy,” em *Journal of Materials Processing Technology*, Nr. 1-3 ed., vol. 77, 1998, pp. 122-128.
- [22] E. Hajjari e M. Divandari, “An investigation on the microstructure and tensile properties of direct squeeze cast and gravity die cast 2024 wrought Al alloy,” em *Materials & Design*, Nr. 9 ed., vol. 29, 2008, pp. 1685 - 1689.
- [23] Zhangr, Chen e Poirier, “Effect of solidification cooling rate on the fatigue life of A356.2-T6 cast aluminium alloy,” em *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Nr. 5 ed., vol. 23, 2000, pp. 417-423.
- [24] H. Berns, “Comparison of wear resistant MMC and white cast iron,” em *Wear*, Nr. 1-2 ed., vol. 254, 2003, pp. 47-54.
- [25] D. Karunakar e G. Datta, “Prevention of defects in castings using back propagation neural networks,” em *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 11-12 ed., vol. 39, 2008, pp. 1111-1124.
- [26] J. Barbosa, H. Puga e J. Oliveira, “Use of Acoustic Energy in Sand Casting of Aluminium Alloys,” em *Advanced Materials Research*, Vols. %1 de %2690 - 693, 2013, pp. 2366-2370.
- [27] E. Vinarcik, “High Integrity Die Casting Processes,” em *Published by John Wiley & Sons, Inc*, Canada, 2003.
- [28] “Fundição Alto da Lixa,” [Online]. Available: www.fal.pt/pt. [Acedido em 23 Julho 2013].
- [29] FAL, *Catálogo da Fundição Alto da Lixa,SA*, Lixa, 2013.
- [30] J. Ribeiro, *Tecnologia Mecânica I*, Bragança, 2009.
- [31] ASM Metals Handbook, vol. 15 Casting, USA: ASM International, 1988.
- [32] G. d. A. Soares, *Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia*, 2000.

- [33] B.Ravi e M.N.Srinivasant, “Casting Solidification analysis by modulus vector method,” 1996. [Online]. Available: www.gobookeee.com. [Acedido em Agosto 2013].
- [34] R. Nariman, “Material Matters - Steel Casting Design Considerations,” 2004. [Online]. Available: www.gobookeee.com. [Acedido em Agosto 2013].
- [35] V. Chiaverini, Tecnologia Mecânica - Processos de fabricação e tratamento, São Paulo: McGraw-Hill,Lda, 1986.
- [36] *Foseco (FS) Limited - How to calculate feeders*, Tamworth, Staffordshire, 2003.
- [37] B.Ravi, Metal Casting - Computer Aided Design and Analysis, New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited, 2005.
- [38] P. Beeley, Foundry Technology, London: Butterworths, 1972.
- [39] J. C. a. R. A.Harding, “The Filling of Castings,” 1994. [Online]. Available: www.gobookeee.com. [Acedido em Agosto 2013].
- [40] “Finite Solutions Incorporated,” 2012. [Online]. Available: www.finitesolutions.com/Products/SOLIDCast.. [Acedido em Agosto 2013].
- [41] “Finite Solutions Incorpored,” 2012. [Online]. Available: www.finitesolutions.com/Products/FLOWCast. [Acedido em Agosto 2013].
- [42] “Castech,” [Online]. Available: www.castech.fi. [Acedido em Agosto 2013].
- [43] “EKKinc,” [Online]. Available: <http://www.ekkinc.com/>. [Acedido em Agosto 2013].
- [44] “Magmasoft,” [Online]. Available: <http://www.magmasoft.com/>. [Acedido em Agosto 2013].
- [45] “Alphacast,” [Online]. Available: <http://www.alphacast-software.co.uk/index4.htm>. [Acedido em Agosto 2013].
- [46] “Novacast,” [Online]. Available: <http://www.novacast.se/>. [Acedido em Agosto

2013].

[47] “Procast,” [Online]. Available: www.esi-group.com/software-services/virtual-manufacturing/casting/procast-quickcast. [Acedido em Agosto 2013].

[48] “Simtec,” [Online]. Available: www.simtec-inc.com. [Acedido em Agosto 2013].

[49] R. Nariman, “Material Matters - Steel casting design considerations,” 2004.

Anexos

Anexo 1

Aplicação prática do cálculo do sistema de alimentação

No ponto 2.5.1 do capítulo 2, determinou-se o módulo de solidificação de um fundido recorrendo a dois métodos distintos. Segundo o método geométrico obtém-se um módulo geométrico de 2,12 cm e segundo a simulação numérica, obtém se um módulo de 2,21 cm.

No caso em questão deparamo-nos com um furo a meio do fundido, na qual nos obriga a alimentar a zona de maior massa que se encontra à volta do furo. Como tal seguindo a regra 6 de fundição, o fundido foi alterado de forma a facilitar a alimentação e o furo foi parcialmente tapado, assim em vez de quatro alimentadores à volta do furo passa a levar um, ao centro do fundido, facilitando a localização, a eficácia, assim como a remoção do mesmo.

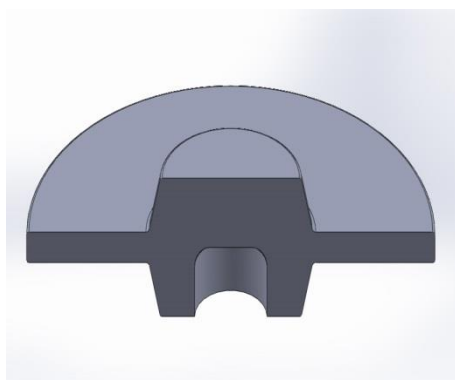


Figura A1.1– Modelo 3D do fundido com furo tapado.

Realizou-se novamente a simulação numérica no RDW, para o fundido com a nova estrutura, onde se obteve novos valores do módulo em cm como mostra a Figura A1.1.

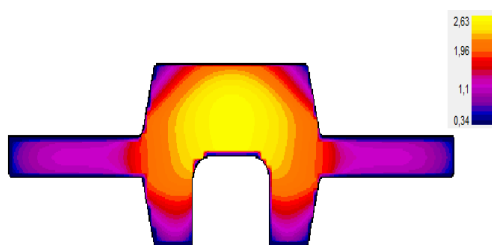


Figura A1.2 – Visualização dos resultados da simulação de solidificação do fundido com nova estrutura no RDW.

➤ Valor do módulo;

$$M = 2,63 \text{ cm}$$

Os alimentadores a utilizar serão do tipo cilíndrico, de topo, com camisa exotérmica FOSECO. O fornecedor providencia uma tabela com as referências das camisas que fabrica, respetivas relações geométricas, módulo de solidificação e volume. A tabela está disponível no Anexo 2.

Através da simulação numérica no RDW, determinou-se o módulo de solidificação do fundido, obtendo-se um módulo de 2,63 cm. O módulo do alimentador terá que apresentar um acréscimo de 20% em relação ao módulo do ponto quente que alimenta. Assim para o módulo de 2,63 cm, o alimentador terá de ter no mínimo um módulo de 3,16 cm.

A aplicação do critério do volume, utilizando os valores indicados na Tabela A1.1, indica que o volume mínimo que o alimentador deve ter será de 1,05 dm³.

Tabela A1.1– Dados utilizados para o cálculo do volume do alimentador pelo critério do volume.

Volume do fundido	10287 cm³
Contração específica da liga	6%
Rendimento do alimentador	65%

O último critério a analisar é o da distância de alimentação. Traçando um círculo, com centro no alimentador com camisa ZTA 4, de raio igual ao raio do alimentador mais 4,5 vezes a espessura menor da peça, obtém-se o raio de ação do alimentador.

Tabela A1.2– Características da camisa exotérmica.

Referência Foseco	Módulo do alim. (cm)	Ø do alim. (mm)	Volume (dm ³)
ZTA 4	3,2	118	1,40

Espessura da peça ≈50 mm

$$\text{Raio de acção} = \left(\frac{118}{2}\right) + (4,5 \times 50) = 284 \text{ mm}$$

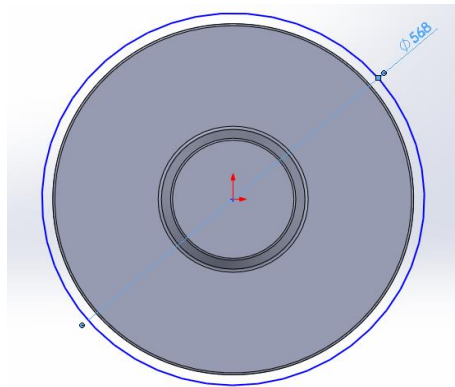


Figura A1.3 – Raio de ação do alimentador.

Depois de respeitar todos os requisitos e com os resultados obtidos, chega-se à conclusão que é possível obter um fundido de boa sanidade interna.

Depois do produto final segue-se os respetivos acabamentos, a maquinação do furo.

Anexo 2

Camisas FOSECO

O fornecedor fornece os valores dos módulos dos alimentadores calculados para o fator de cerca de 50%. O valor do fator considerado nesta dissertação é de 20 %. Assim, após calcular o critério do módulo, verificado na 3ª coluna, e o critério do volume verificado na 10ª coluna da Tabela A2.1, optou-se pelo alimentador ZTA4 na 9ª linha.

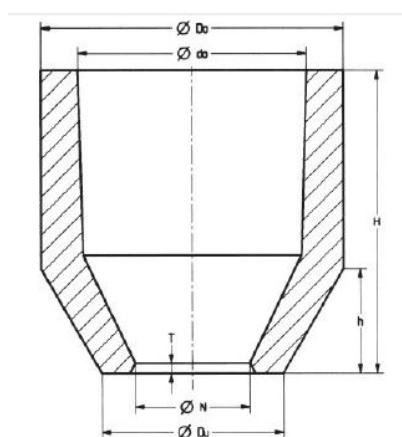


Figura A2.1 – Esquemática do alimentador e camisas utilizadas.

Tabela A2.1 Tabela do fornecedor com as relações geométricas e módulos dos alimentadores produzidos.

Type	Modulus		Nominal Dimensions							Capa- city (dm ³)
	TA feeder	geom	Du	N	Do	do	H	h	T	
ZTAO	1,5	1,0	50	25	72	50	100	20	3	0,18
HDTAO	1,5	1,0	55	30	75	50	100	15	3	0,18
ZTA1	2,1	1,4	69	38	100	78	100	27	3	0,41
HDTA1	2,1	1,4	69	38	100	78	100	27	3	0,413
ZTA2	2,3	1,5	74	45	114	85	100	34	3	0,48
ZTA2R	2,6	1,7	74	45	115	87	150	34	4	0,8
ZTA3	2,7	1,8	80	48	125	94	150	50	4	0,93
ZTA3R	2,9	1,9	76	48	134	95	175	40	4	1,14
ZTA4	3,2	2,1	97	60	157	118	150	50	4	1,40
ZTA4-5	3,8	2,5	120	70	192	147	165	68	5	2,30
ZTA5	4,1	2,7	120	70	192	147	195	68	6	3,00
ZTA5-6	4,4	2,9	132	87	222	175	200	90	6	3,90
XTA6	4,8	3,2	132	87	222	175	250	90	6	5,10
XTA7	5,1	3,5	150	100	250	200	250	100	6	6,50
XTA8	5,5	3,8	160	110	278	225	250	110	6	8,00
XTA9	6,2	4,3	180	124	310	252	300	120	8	12,20
XTA10	7,0	4,8	210	150	360	300	300	140	8	17,00
XTA11	7,7	5,3	240	175	410	355	300	155	8	22,60

Anexo 3

Aplicação prática do sistema de enchimento

Depois do cálculo do sistema de alimentação, segue-se a etapa de dimensionar o sistema de enchimento.



Figura A3.1 – Cacho da peça utilizado no caso prático.

Tabela A3.1 – Dados referentes ao fundido.

Dados	Valores
Peso do fundido	75 Kg
Peso do alimentador	11 Kg
Espessura mais fina da peça	50 mm
Volume do cacho	$1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$
Altura da colher de vazamento à base do gito	0,25 m

A primeira etapa é determinar o volume total de metal que será contido na moldação, para que se possa verificar a velocidade na base do gito. Para iniciar os cálculos um dado necessário é o tempo máximo de enchimento através da equação (2.11).

$$t_{m\acute{a}x} = \left(0,4 \times \left(1,4 \times \frac{50}{14} \right) \right) \times \sqrt{75(\text{peça}) + 11(\text{alim.}) + 10(\text{gito, canal e ataque})} \quad (2.11)$$

$$t_{m\acute{a}x} \approx 20s$$

Antes de calcular a área do gito, é necessário determinar a velocidade de escoamento do metal líquido na base do gito a partir da equação(2.12).

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - K)} \text{ ou } v_2 = K\sqrt{2g \times h_1} \quad (2.12)$$
$$v_2 = 0,5\sqrt{2 \times 9,81 \times 0,25}$$

$$v_2 = 1.11 \text{ m/s}$$

O volume do cacho foi obtido através da ferramenta SolidWorks, $V_{metal}=1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$.

Conhecendo-se o volume de metal e a velocidade na base do gito de descida, pode-se calcular a área da base do gito a partir da equação (2.13) e verificar o tipo de escoamento através do número de Reynolds, equação (2.17), os valores de ρ e μ foram retirados da Tabela 2.6 do ponto 2.6.3.2 do capítulo 2.

Área do gito,

$$A_g = \frac{V_{metal}}{v_2 \times t_{max}} \quad (2.13)$$

$$A_g = \frac{1,2 \times 10^{-2}}{1.11 \times 20}$$

$$A_g = 5.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 540 \text{ mm}^2$$

Diâmetro da base do gito,

$$D_{bg} = 2 \times \sqrt{\frac{A_g}{\pi}} \quad (2.14)$$

$$D_{bg} = 2 \times \sqrt{\frac{540}{\pi}}$$

$$D_{bg} = 26,2 \text{ mm} \approx 30 \text{ mm}$$

A estrutura do gito deverá seguir a seguinte configuração:

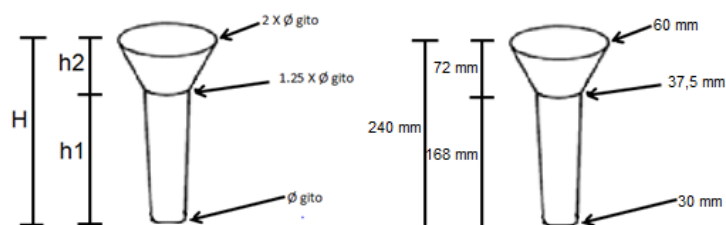


Figura A3.2 – Representação das dimensões do gito, no caso prático.

Sendo $H=240\text{mm}$,

$$h1 = 0,70 \times H \quad (2.15)$$

$$h_1 = 72 \text{ mm}$$

$$h_2 = 0,30 \times H \quad (2.16)$$

$$h_2 = 168 \text{ mm}$$

Numero de Reynolds,

$$N_R = \frac{v_2 D \rho}{\mu} \quad (2.17)$$

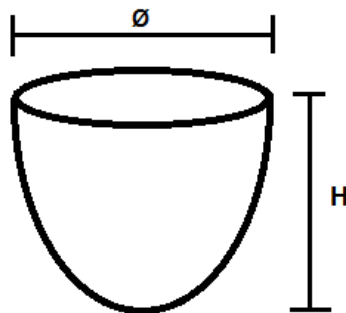
$$N_R = \frac{1,11 \times 0,03 \times 6980}{6,2 \times 10^{-2}}$$

$$N_R = 3715,16$$

Como o número de Reynolds está no intervalo, $2000 \leq N_R \leq 20000$, o escoamento misto. Portanto, ao longo do escoamento, este vai-se processar de forma laminar com um pouco de turbulência nas paredes do molde, que é totalmente tolerável.

Sabendo o diâmetro da base do gito, calcula-se a dimensão do poço do gito de descida.

Cálculo do poço do gito de descida.



Diâmetro do poço.

$$\phi_{\text{poço}} = \phi_{\text{base do gito}} \times 1,5 \quad (2.18)$$

$$\phi_{\text{poço}} = 30 \times 1,5$$

$$\phi_{\text{poço}} = 45 \text{ mm}$$

Altura do poço:

$$H = \phi_{poço} \times 1,2 \quad (2.19)$$

$$H = 45 \times 1,2$$

$$H = 54 \text{ mm}$$

Segue-se o dimensionamento dos canais de distribuição e ataques, começando por escolher o tipo de sistema a utilizar. A seguir é mostrado uma relação de um sistema pressurizado e respetivas áreas, sendo a relação 1:0,80:0,60 a melhor relação que se enquadra neste problema.

Tabela A3.2 – Relação do sistema pressurizado.

	Relação	Áreas
Gito	1	540 mm ²
Canal de distribuição	0,80	432 mm ²
Ataque	0,60	324 mm ²

Cálculo do canal de distribuição:

Para o cálculo do canal de distribuição, começa-se por calcular a área do mesmo pela equação (2.20).

$$A_{cd} = A_g \times \text{relação do sistema} \quad (2.20)$$

$$A_{cd} = 540 \times 0,80$$

$$A_{cd} = 432 \text{ mm}^2$$

Como o cacho em questão tem mais do que um canal, tem que se dividir a área do canal pelo respetivo número de canais, neste caso é n=2.

$$A_{cd} = \frac{A_{cd}}{n} \quad (2.21)$$

$$A_{cd} = \frac{432}{2}$$

$$A_{cd} = 216 \text{ mm}^2$$

A área resultante da equação anterior será a área para cada canal.

Posteriormente ao cálculo da área considera-se a forma de um retângulo de modo a calcular as dimensões do ataque.

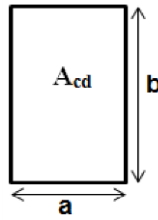


Figura A3.3 – Estrutura do canal de distribuição.

$$a = \sqrt{A_{cd}} \times 0,85 \quad e \quad b = \sqrt{A_{cd}} \times 1,15 \quad (2.22) \text{ e } (2.23)$$

$$a = \sqrt{216} \times 0,85 \quad e \quad b = \sqrt{216} \times 1,15$$

$$a = 13 \text{ mm} \quad e \quad b = 17 \text{ mm}$$

Contudo, as dimensões dos dois canais de distribuição serão, 13mm X 17 mm, em cada canal.

Cálculo do ataque

No cálculo do ataque o procedimento é o mesmo que no cálculo do canal de distribuição, alterando apenas o fator de relação do sistema para o cálculo da área do ataque e a estrutura do ataque invertendo o retângulo.

$$A_{atq} = A_g \times \text{relação do sistema} \quad (2.24)$$

$$A_{atq} = 540 \times 0,60$$

$$A_{atq} = 324 \text{ mm}^2$$

Como o cacho em questão tem mais do que um ataque, tem que se dividir a área do ataque pelo respectivo número de ataques, neste caso é n=2.

$$A_{atq} = \frac{A_{atq}}{n} \quad (2.25)$$

$$A_{atq} = \frac{324}{2}$$

$$A_{atq} = 162 \text{ mm}^2$$

A área resultante da equação anterior será a área para cada ataque.

Posteriormente ao cálculo da área considera-se a forma de um retângulo de modo a calcular as dimensões do ataque.

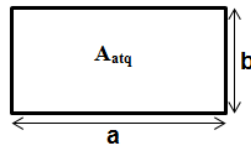


Figura A3.4 – Estrutura do ataque.

$$a = \sqrt{A_{atq}} \times 1,25 \quad e \quad b = \sqrt{A_{atq}} \times 0,75 \quad (2.26) \text{ e } (2.27)$$

$$a = \sqrt{162} \times 1,25 \quad e \quad b = \sqrt{162} \times 0,75$$

$$a = 16,5 \text{ mm} \quad e \quad b = 10$$

Contudo, as dimensões dos dois ataques serão, 16,5mm X 10 mm, em cada ataque.

Anexo 4

Resumo e apresentação no congresso primeiro encontro de jovens investigadores no Instituto politécnico de Bragança

ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO EM FUNDIÇÃO

Teixeira, Rui¹, Ribeiro, J.², Lopes, H.³, Campos, C.⁴

¹ rui_16rli@hotmail.com, ESTIG, IPB, Portugal

² jrbeiro@ipb.pt, Tecnologia Mecânica, IPB, Portugal

³ hml@isep.ipp.pt, Engenharia Mecânica, ISEP, Portugal

⁴ ccampos@fal.pt, Departamento Técnico e Comercial, FAL, Portugal

RESUMO

Neste trabalho pretende-se verificar a potencialidade da simulação numérica com elementos finitos na previsão de defeitos em casos onde, analiticamente, apresentam uma boa formulação a nível de alimentação e gítagem, contudo, durante o processo de fabrico verificou-se que ocorriam defeitos nas peças do tipo rechupe.

Para a realização deste trabalho foram efectuadas várias simulações numéricas utilizando programas comerciais de elementos finitos, onde foram testados diferentes formulações e parâmetros de fundição. Verificou-se que simulações implementadas prevêm, com elevada acuidade, a ocorrência ou não de rechupe nas peças dependendo dos parâmetros ou formulações utilizadas. Os resultados das simulações foram comprovados após o fabrico das peças.

No desenrolar do trabalho verificou-se que o parâmetro temperatura de vazamento teve uma elevada importância na ocorrência de defeitos tipo rechupe nas peças em estudo, uma vez que tem um papel importante na fluidez do metal líquido quando entra nas cavidades da moldação. Numa fusão com carga suficiente para vinte moldações, situação idêntica ao caso de estudo, a temperatura de vazamento na última moldação pode ter uma diminuição de 100°C em relação à primeira moldação, no entanto, o metal nas últimas moldações vai possuir menor fluidez que as primeiras moldações. Foi verificado que as simulações numéricas permitem prever este fenómeno e dimensionar o valor da carga para evitar a ocorrência do rechupe nas peças.

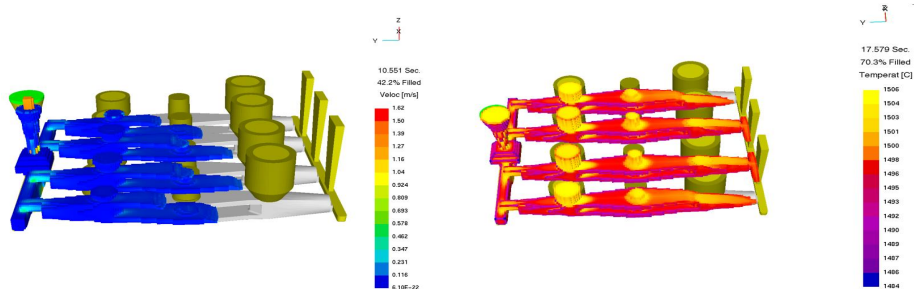


Figura A4. 1 – Representação da velocidade (imagem esquerda) e da temperatura (imagem direita) do fluido durante o enchimento.

Palavras-chave: Rechupe; Simulação numérica; Temperatura de vazamento.

AGRADECIMENTOS: Agradecemos à empresa Fundação Alto da Lixa, SA (FAL) pela cedência dos programas comerciais de simulação numérica bem como a disponibilidade das suas instalações durante o estudo.

Apresentação

I Encontro de Jovens Investigadores do IPB

ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO EM FUNDIÇÃO

R. Teixeira*, J. Ribeiro*, H. Lopes**, C. Campos***

* ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança
 ** ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto
 *** FAL – Fundação do Alto da Lixa, S.A.

Instituto Politécnico de Bragança, 15-16 de Novembro