

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

# Enchimento e solidificação de peças em ligas de cobre obtidas por baixa pressão

Pedro Fernandes de Ataíde e Melo

**U.** PORTO

**FEUP** FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador no INEGI: Eng<sup>o</sup> Rui Jorge de Lemos Neto

Orientador na FEUP: Eng<sup>o</sup> Abel Dias dos Santos

30 de Junho de 2014



# **Enchimento e solidificação de peças em ligas de cobre obtidas por baixa pressão**

**Pedro Fernandes de Ataíde e Melo**

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica



# Resumo

A presente dissertação aborda a temática da fundição por baixa pressão das ligas de cobre, sendo estudado o processo e analisadas propostas de melhoria deste. Para tal foram estudadas torneiras em latão que apresentavam defeitos oriundos do processo de fundição e do projeto das mesmas.

A revisão bibliográfica incide no processo de fundição por baixa pressão, nas ligas de cobre, nomeadamente os latões, nos defeitos comuns na fundição destas e na fundição em coquilha; é, depois, validada a metodologia de simulação numérica de enchimento e solidificação destas peças com recurso a *software* computacional de modelação numérica por elementos finitos.

São simuladas as solidificações de um modelo de torneiras que apresenta problemas ao nível de fugas, potenciadas pelo aparecimento de defeitos de fundição. Este trabalho pretende eliminar estes defeitos, atuando tanto no desenho da coquilha como nos parâmetros de vazamento.

São analisados os resultados à luz da sua validade prática, auferindo o grau de certeza atingido com o *software* de simulação *versus* os resultados obtidos experimentalmente, e as respetivas conclusões são expostas.

Apresentam-se ainda sugestões para trabalhos futuros que abordem o mesmo tema.



# Abstract

The current thesis studies the topic of Low Pressure Die-Casting of Copper Alloys, focusing on the process properties and studying new and innovative possibilities for improvement. Components, provided by an industrial company, prone to presenting defects such as leakage under pressure tests were analyzed in order to perform developments and improve the process in order to avoid any defect.

The bibliographic revision focuses on the process, Low Pressure Die-Casting, on copper alloys, mainly brasses and also on common casting defects in metal dies; afterwards, the methodology of numerical simulation of filling and freezing of these parts is validated using computational software by Finite Element Method.

The cooling and freezing of a specific tap model is simulated. The aim of this work is to study the formation mechanisms of the defects present in the part, such as shrinkage porosity, and to eliminate them by changing the geometry of the die or by redefining casting specifications.

The results were analyzed taking into account their practical value, comparing the simulation results with the actual ones which are found in the parts, using a previously validated methodology.

Suggestions for future works are presented in the final chapter of the present document, regarding this same topic.





# Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, Engenheiro Rui Neto, por todo o apoio, paciência e conhecimento transmitido ao longo deste trabalho. Com ele aprendi o tipo de engenheiro que quero ser. Sem a sua orientação e amizade nunca teria conseguido tomar o rumo certo na elaboração do trabalho a que me propus.

Uma nota de agradecimento ao Professor Abel Santos pelo seu apoio, disponibilidade e amizade no acompanhamento do trabalho.

Agradeço à Professora Teresa Duarte toda a disponibilidade com que me ajudou e apoiou.

Agradeço também ao Paulo Machado pela disponibilidade com que tinha sempre "5 minutos", que invariavelmente se transformaram em mais tempo.

I'd like to address a very very big thank you note to Song Nannan, who helped me and who lost several of her work hours when helping me. Without her, there would be no way to finish my work in time: Thank you!

O meu maior "Obrigado" é dirigido aos meus pais, a força por trás de mim que nunca deixaram de acreditar e sempre me apoiaram ao longo do meu atribulado percurso académico; obrigado não tem sílabas suficientes para exprimir o meu agradecimento por serem quem são e por me ensinarem a ser quem sou.

Quero agradecer aos meus amigos todos, principalmente à Mafalda, ao Trigo, ao Rafa, ao Pinto, à Mariana, ao João, à Catarina e ao Rúben, e a todos os outros que não referi aqui, pela sua paciência, ânimo, força e divertimento com que apoiaram ao longo deste trabalho.

A todos, o meu mais sincero Obrigado.

Pedro Melo



*“Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.”*

Ricardo Reis, Fernando Pessoa



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto do tema . . . . .	1
1.2	Objetivos e Motivação . . . . .	1
1.3	A CIFIAL e o INEGI . . . . .	2
1.4	Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1	Introdução . . . . .	3
2.2	Fundição por Baixa Pressão . . . . .	3
2.3	Cobre e Ligas de Cobre . . . . .	9
2.3.1	Ligas Utilizadas . . . . .	10
2.3.2	Utilização de Machos . . . . .	22
2.3.3	Defeitos Comuns na Fundição . . . . .	25
2.3.4	Análise aos defeitos das peças da CIFIAL . . . . .	47
2.4	Simulação Numérica . . . . .	48
2.4.1	O uso da modelação numérica nos Processos de Fundição . . . . .	49
2.4.2	Método de Elementos Finitos e Método das Diferenças Finitas . . . . .	50
2.4.3	Programas e Códigos . . . . .	51
2.5	Resumo . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Parte Experimental</b>	<b>53</b>
3.1	Introdução . . . . .	53
3.2	Identificação do problema a tratar . . . . .	53
3.3	Metodologia Utilizada . . . . .	56
3.4	Análise e Simulação . . . . .	63
3.4.1	Simulações . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>67</b>
4.1	Análise aos resultados . . . . .	71
4.2	Conclusões . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>75</b>
5.1	Satisfação dos Objetivos . . . . .	75
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	76
	<b>Referências</b>	<b>77</b>
	<b>Anexos</b>	<b>79</b>

<b>A</b>	<b>Análise aos defeitos das peças da CIFIAL</b>	<b>81</b>
A.1	Imagens das Fugas Estudadas - INEGI . . . . .	81
A.2	Comentários às fotografias . . . . .	103
A.3	Relatório Apresentações PowerPoint - Simulações de Enchimento . . . . .	104
A.3.1	Cifial - Relatório Simulação: Torneira ref. 7630476 . . . . .	104
A.3.2	Low pressure die casting of Tap - V2 . . . . .	107
A.3.3	Add riser for the tap . . . . .	110
A.3.4	Low pressure die casting of Tap - coating and riser using . . . . .	113
A.3.5	Cifial-riser with sand core-V2 . . . . .	115
A.3.6	Cifial-riser with sand core-V3 . . . . .	117
<b>B</b>	<b>Desenho de Definição - Alimentador</b>	<b>119</b>
<b>C</b>	<b>Desenho de Definição - Coquilha Superior</b>	<b>121</b>
<b>D</b>	<b>Desenho de Definição - Macho de Areia Esquerdo</b>	<b>123</b>
<b>E</b>	<b>Desenho de Definição - Macho de Areia Direito</b>	<b>125</b>
<b>F</b>	<b>Propriedades da Liga Utilizada no ProCAST</b>	<b>127</b>

## Lista de Figuras

2.1	Forno de Baixa Pressão . . . . .	4
2.2	Diagrama de Equilíbrio - Latões . . . . .	10
2.3	Variação das Propriedades Mecânicas com o Título Fictício de cobre dos Latões Vazados em Coquilha . . . . .	12
2.4	Peça mal ligada . . . . .	29
2.5	Peças com e sem Inclusões de Areia . . . . .	30
2.6	Peça com excesso de grafite . . . . .	31
2.7	Peças com poros . . . . .	32
2.8	Curva de Arrefecimento para um Latão 60-40 . . . . .	33
2.9	Diferentes tipos de Rechupes e Micro-Rechupes . . . . .	34
2.10	Peça com Rechupe . . . . .	36
2.11	Desenvolvimento de forças devido a contrações internas nas peças . . . . .	38
2.12	Peça com fissura . . . . .	41
2.13	Peças com macho partido e deslocado . . . . .	42
2.14	Peça com Rugosidade . . . . .	43
2.15	Peça com enchimento incompleto . . . . .	44
2.16	Peça com Rebarbas . . . . .	45
2.17	Peça com caudas de cometa . . . . .	46
2.18	Peça com refervido . . . . .	47
3.1	CAD da Peça Inicial . . . . .	53
3.2	Sentido de Corte das Torneiras . . . . .	54
3.3	Micrografia de Defeito . . . . .	54
3.4	Placa Direita da Coquilha . . . . .	57
3.5	Placa Esquerda da Coquilha . . . . .	57
3.6	Macho Interior . . . . .	58
3.7	Esquema do Alimentador . . . . .	58
3.8	CAD do Macho com Cavidade . . . . .	59
3.9	CAD do Macho sem Cavidade . . . . .	60
3.10	CAD do Bloco Auxiliar . . . . .	60
3.11	CAD do Bloco Auxiliar com a Geometria . . . . .	61
3.12	CAD do Macho com a Geometria da Peça . . . . .	61
3.13	CAD do Macho com cavidade com a Geometria da Peça . . . . .	62
3.14	CAD da Coquilha com Cavidades para Machos . . . . .	62
3.15	CAD da Coquilha com Machos . . . . .	63
3.16	Vista da Zona que origina espessura 0 . . . . .	64
3.17	Vista da Zona que origina espessura fina . . . . .	64
3.18	Vista da Zona que origina espessura 0, corrigida . . . . .	65

3.19	Vista da Zona que origina espessura fina, corrigida . . . . .	65
4.1	Vista do Modelo 3D da Torneira com novos alimentadores . . . . .	68
4.2	Vista do Modelo 3D dos novos Machos . . . . .	69
4.3	Vista do Corte na Secção Crítica - Plano YZ . . . . .	70
4.4	Vista do Corte na Secção Crítica, Formação de rechupes no alimentador - Plano XY . . . . .	70
4.5	Vista do Corte na Secção Crítica, Formação de rechupes na zona crítica interior - Plano XY . . . . .	71
4.6	Vista do Corte na Secção Crítica, Formação de Rechupes - Plano YZ . . . . .	72
4.7	Vista do Corte na Secção Crítica, Fracção Sólida - Plano YZ . . . . .	73
A.1	Indicação do corte e polimento nas torneiras retiradas do controlo . . . . .	82
A.2	Cortes na torneira com muitas fugas e com poucas fugas . . . . .	82
A.3	Peça (A) - Sem Fuga - 23× . . . . .	83
A.4	Peça (A) - Sem Fuga - 23× . . . . .	83
A.5	Peça (A) - Sem Fuga - 75× . . . . .	84
A.6	Peça (A) - Sem Fuga - Com Ataque - 150× . . . . .	84
A.7	Peça (A) - Sem Fuga - Com Ataque - 750× . . . . .	85
A.8	Peça (B) - Sem Fuga - 23× . . . . .	86
A.9	Peça (B) - Sem Fuga - 75× . . . . .	86
A.10	Peça (B) - Sem Fuga - Com Ataque - 300× . . . . .	87
A.11	Peça (B) - Sem Fuga - 750× . . . . .	87
A.12	Peça (C) - Com Fuga - 23× . . . . .	88
A.13	Peça (C) - Com Fuga Grande - Dentro - 23× . . . . .	88
A.14	Peça (C) - Com Fuga Grande - Dentro - 150× . . . . .	89
A.15	Peça (C) - Com Fuga Grande - Com Ataque - Dentro - 300× . . . . .	89
A.16	Peça (C) - Com Fuga Grande - Com Ataque - Dentro - 750× . . . . .	90
A.17	Peça (C) ? - Com Fuga Grande - 23× . . . . .	91
A.18	Peça (C) ? - Com Fuga Grande - Dentro - 23× . . . . .	91
A.19	Peça (C) ? - Com Fuga Grande - Dentro - 150× . . . . .	92
A.20	Peça (C) ? - Com Fuga Grande - Dentro - 300× . . . . .	92
A.21	Peça (D) - Com Fuga Pequena - 23× . . . . .	93
A.22	Peça (D) - Com Fuga Pequena - 75× . . . . .	93
A.23	Peça (D) - Com Fuga Pequena - 300× . . . . .	94
A.24	Peça (D) - Com Fuga Pequena - 300× . . . . .	94
A.25	Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 23× . . . . .	95
A.26	Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 75× . . . . .	95
A.27	Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 300× . . . . .	96
A.28	Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 300× . . . . .	96
A.29	Peça (E) - Com Fuga Pequena - 23× . . . . .	97
A.30	Peça (E) - Com Fuga Pequena - 23× . . . . .	97
A.31	Peça (E) - Com Fuga Pequena - 75× . . . . .	98
A.32	Peça (E) - Com Fuga Pequena - 75× . . . . .	98
A.33	Peça (E) - Com Fuga Pequena - 75× . . . . .	99
A.34	Peça (E) - Com Fuga Pequena - 300× . . . . .	99
A.35	Peça (E) - Com Fuga Pequena - 300× . . . . .	100
A.36	Peça (E).1 - Com Fuga Pequena - 23× . . . . .	101
A.37	Peça (E).1 - Com Fuga Pequena - 75× . . . . .	101
A.38	Peça (E).1 - Com Fuga Pequena - 300× . . . . .	102



A.39 Fração Sólida da Torneira - plano <i>XY</i> . . . . .	105
A.40 Fração Sólida da torneira - plano <i>YZ</i> . . . . .	105
A.41 Fração Sólida da Torneira - plano <i>XZ</i> . . . . .	106
A.42 Fração Sólida da Torneira - plano paralelo a <i>XZ</i> . . . . .	106
A.43 Tempo de Solidificação - Planos <i>YZ</i> (a) e <i>XY</i> (b) . . . . .	107
A.44 Proposta de Solução . . . . .	107
A.45 Vista em corte no plano <i>XY</i> - Fração Sólida (a) e Porosidades na Contração (Rechupes) (b) . . . . .	108
A.46 Vista em corte no plano <i>YZ</i> - Porosidades na Contração (Rechupes) (a) e Fração Sólida (b) . . . . .	109
A.47 Vista em corte no plano <i>XY</i> segundo o eixo da torneira - Fração Sólida (a) e Porosidades na Contração (Rechupes) (b) . . . . .	109
A.48 Vista em corte no plano <i>YZ</i> junto aos alimentadores na boca da torneira - Porosidades na Contração (Rechupes) (a) e Fração Sólida (b) . . . . .	110
A.49 Peças com geometria modificada . . . . .	111
A.50 Porosidades na Contração (Rechupes) na torneira com 5 – 10 <i>mm</i> . . . . .	112
A.51 Porosidades na Contração (Rechupes) na torneira com 15 – 20 <i>mm</i> . . . . .	112
A.52 Configuração aproximada do isolamento e relação entre espessura aplicada e Coeficiente de Transferência de Calor . . . . .	113
A.53 Porosidades na Contração (Rechupes) considerando a utilização de uma camada de isolante de 300 $\mu m$ . . . . .	113
A.54 Localização da área estudada . . . . .	114
A.55 Introdução de alimentadores (a) e alteração à geometria do macho (b) . . . . .	114
A.56 Porosidades na Contração (Rechupes) considerando a modificação de geometria proposta . . . . .	114
A.57 Alteração à geometria da peça, com introdução de alimentadores e respectivos machos	115
A.58 Contrações na Solidificação (Rechupes) com o sistema alimentador+macho (a) e sem qualquer gito localizado (b) . . . . .	115
A.59 Contrações na Solidificação (Rechupes) para Temperaturas de vazamento de 995°C (a) e 955°C (b) . . . . .	116
A.60 Formação de rechupes com o uso do <i>Insulation Riser</i> . . . . .	117
A.61 Nova geometria da torneira com gito (a) e macho de areia para revestimento (b) .	117
A.62 Formação de rechupes com o novo gito e respetivo macho . . . . .	118
A.63 Formação de Rechupes - Possível Mudança de Liga . . . . .	118
F.1 Composição da Liga da Simulação . . . . .	127
F.2 Intervalo de Solidificação da Liga da Simulação . . . . .	128
F.3 Condutividade Térmica da Liga da Simulação . . . . .	128
F.4 Densidade da Liga da Simulação . . . . .	128
F.5 Entalpia da Liga da Simulação . . . . .	129
F.6 Fracção Sólida da Liga da Simulação . . . . .	129
F.7 Viscosidade da Liga da Simulação . . . . .	130



## Lista de Tabelas

2.1	Fases Presentes nos Latões . . . . .	11
2.2	Propriedades Mecânicas Típicas de Latões Vazados em Coquilha . . . . .	12
2.3	Comparação entre duas ligas para evidenciar o efeito do chumbo nas propriedades mecânicas . . . . .	13
2.4	Composição nominal e medida num latão convencional (C84400) e num latão sem chumbo (C89520) . . . . .	15
2.5	Liga com Chumbo utilizada na <i>CIFIAL</i> . . . . .	16
2.6	Liga sem Chumbo utilizada na <i>CIFIAL</i> . . . . .	16
2.7	Comparação da composição química entre vários latões e bronzes utilizados na indústria de torneiras e canalizações. . . . .	18
2.8	Propriedades mecânicas das várias ligas utilizadas na indústria de torneiras e canalizações. . . . .	19
2.9	Ligas de cobre, composição química e propriedades . . . . .	21
2.10	Composição Química da Liga Utilizada nas Coquilhas na <i>CIFIAL</i> . . . . .	21
2.11	Defeitos mais usuais na fabricação de machos em areia (Parte I) . . . . .	23
2.12	Defeitos mais usuais na fabricação de machos em areia (Parte II) . . . . .	24
2.13	Classificação dos defeitos de fundição em coquilha . . . . .	27
2.14	Causas e Correções para Metal mal ligado . . . . .	28
2.15	Causas e Correções para Inclusões de Areia . . . . .	30
2.16	Causas e Correções para Inclusões de Grafite . . . . .	31
2.17	Causas e Correções para Defeitos Gasosos . . . . .	32
2.18	Ligas e formas de solidificação . . . . .	35
2.19	Causas e Correções para Rechupes . . . . .	36
2.20	Coefficientes de Expansão, Temperaturas de Fusão e Contrações Lineares no estado sólido típicas para alguns metais . . . . .	37
2.21	Contração no estado sólido para alguns metais . . . . .	38
2.22	Causas e Correções para Fissuras . . . . .	40
2.23	Causas e Correções para Machos partidos ou deslocados . . . . .	42
2.24	Causas e Correções para Rugosidades . . . . .	43
2.25	Causas e Correções para Enchimento Incompleto . . . . .	44
2.26	Causas e Correções para Rebarbas . . . . .	45
2.27	Causas e Correções para Caudas de cometa . . . . .	46
2.28	Causas e Correções para Refervido . . . . .	47
3.1	Valores Utilizados no Dimensionamento do Alimentador . . . . .	59
3.2	Características do PC Utilizado . . . . .	66
4.1	Liga Utilizada na Simulação VS Liga Utilizada na <i>CIFIAL</i> . . . . .	67

4.2	Condições Iniciais da Simulação . . . . .	68
A.1	Condições Iniciais - Torneira ref. 7630476 . . . . .	104
A.2	Condições Iniciais - Low pressure die casting of Tap - V2 . . . . .	108
A.3	Novas condições de vazamento . . . . .	116
A.4	Liga utilizada . . . . .	116

## Abreviaturas e Símbolos

PLC	Programmable Logic Controller
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
LPDC	Low Pressure Die-Casting
GB	<i>GigaBytes</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contexto do tema

A presente dissertação aborda, de forma detalhada, o enchimento e solidificação de peças em ligas de cobre obtidas pelo processo de baixa pressão. Partindo deste tema, estuda-se aprofundadamente o processo de vazamento por baixa pressão, *Low Pressure Die Casting*, a sua relação com o fabrico de torneiras em latão, as especificidades e propriedades das ligas de cobre (nomeadamente dos latões e dos bronzes), os defeitos existentes na fundição em coquilha destas ligas e, finalmente, efetuam-se simulações numéricas para a obtenção de propostas de melhoria no comportamento do caso em estudo.

O fabrico de torneiras em latão é uma prática comum na indústria há já alguns anos. Com a proibição da introdução de chumbo nestas ligas, recorreu-se à utilização de latões sem chumbo ("amigos do ambiente"). Uma alteração de liga é, em qualquer processo, uma grande mudança nos parâmetros de fabrico de qualquer peça; no caso das torneiras em estudo, a remoção do chumbo e sua substituição por outros elementos levou ao aparecimento de alguns defeitos graves nas peças produzidas, nomeadamente rechupes, consequentes micro-rechupes e alguma fissuração a quente.

### 1.2 Objetivos e Motivação

O principal objetivo deste trabalho é o de conseguir controlar o aparecimento dos defeitos referidos na secção anterior, procurando simultaneamente melhorar o processo de fundição por baixa pressão, suportando as propostas efetuadas com recurso à simulação numérica em *software* de simulação pelo método dos elementos finitos.

Dado que existe pouca literatura e bibliografia relativa ao tema tratado, especificamente à utilização das ligas para a produção de torneiras, foi feita uma extensa revisão e pesquisa bibliográfica relativa aos temas em estudo.

Uma das maiores motivações para a realização deste trabalho foi a de poder criar uma base de estudo para a temática de controlo de defeitos de fundição em ligas não-ferrosas, em ambiente industrial, tendo em conta todas as restrições que este contexto acarreta. Seguramente o presente

trabalho nunca se encontrará completamente finalizado, dada a grande quantidade de informação existente e a sua evolução constante no seio de uma indústria que se encontra de novo a crescer no mercado.

### 1.3 A CIFIAL e o INEGI

A *CIFIAL* é uma das maiores e mais antigas (fundada em 1904) empresas portuguesas na área do fabrico de ferragens, fechaduras, sistemas eletrónicos de controlo de acesso, torneiras e acessórios de casa de banho e, recentemente, louça sanitária. Grande parte dos produtos que fabricam são fundidos por baixa pressão e em latão, sendo depois maquinados, polidos e cromados, podendo ser finalizados com acabamento em PVD, por exemplo. É, como se vê, uma empresa que está na frente do avanço tecnológico e de implementação de novas tecnologias e soluções inovadoras.

O *INEGI* é uma instituição que funciona como ponte entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a Indústria. Fundado em 1986 no seio do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, serve como interface entre o mundo académico e industrial. A relação do *INEGI* com a *CIFIAL* já data desde há algum tempo e foi frutífera, sendo que a integração do presente trabalho nesta relação é uma naturalidade e um oportunidade para o aprofundamento com o mundo industrial.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada tendo como base a estrutura típica dos documentos de dissertação elaborados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: o presente capítulo é introdutório, contextualizando o tema e as motivações para o trabalho; no capítulo 2 é apresentada toda a revisão e pesquisa bibliográfica efetuada relativamente aos temas tratados; no capítulo 3 é apresentada a descrição e metodologia utilizada na parte prática do trabalho; posteriormente, no capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no âmbito do trabalho desenvolvido; finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as notas finais, conclusões e sugestões de trabalho futuro.

Posteriormente, apresentam-se anexos referentes à pesquisa bibliográfica e ao trabalho realizado.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

No presente capítulo é apresentada a revisão bibliográfica efetuada no âmbito do trabalho, com foco no processo de Fundição por baixa pressão, secção 2.2, nas ligas de cobre, secção 2.3, e nos processos de simulação numérica de uso genérico e específico, secção 2.4.

### 2.1 Introdução

Dado o foco de estudo deste trabalho, são explorados os temas de fundição por baixa pressão, ligas de cobre e simulação numérica. É apresentado o estado da arte destes temas, com respetivas referências bibliográficas de literatura e artigos publicados. A fundição por baixa pressão de ligas de cobre é um processo extensamente usado no fabrico de torneiras, como é o caso da *CIFIAL*, mas que apesar da sua atualidade apresenta espaço para melhorias, principalmente aquando da remoção do chumbo como elemento admissível nas ligas utilizadas.

### 2.2 Fundição por Baixa Pressão

O processo de fundição por baixa pressão utiliza moldações permanentes, vulgarmente designadas por coquilhas, que são enchidos com metal líquido a baixa pressão (tipicamente entre 0.5 a 7 MPa) com velocidades reduzidas, produzindo peças com excelente qualidade e ótimas propriedades mecânicas.

Um equipamento típico de fundição por baixa pressão (apresentado na figura 2.1) é constituído por vários elementos, sendo que essencialmente contém:

- Forno;
- Câmara de Pressão;
- Tubo de Alimentação;
- Moldação (Móvel e/ou Fixa).

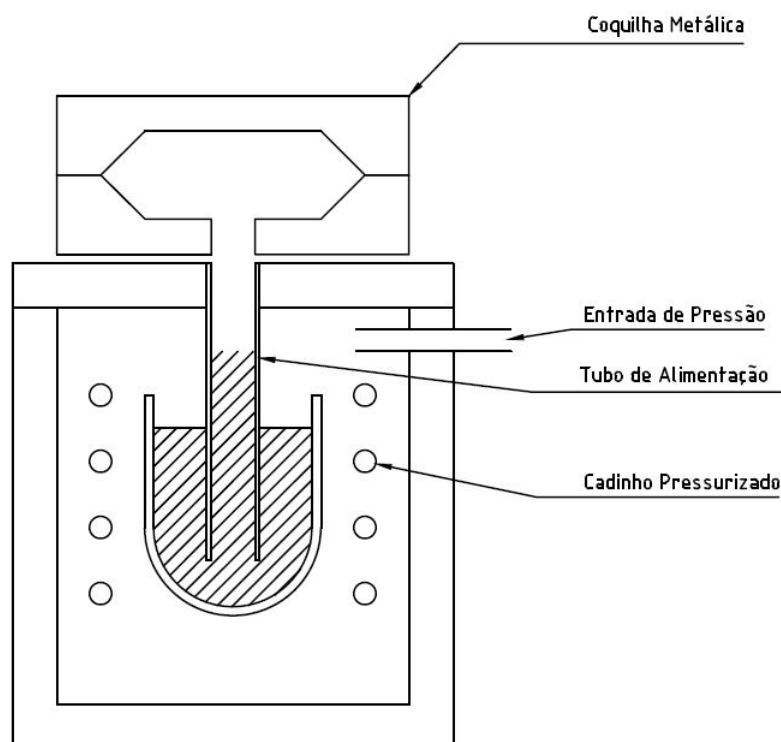


Figura 2.1: Esquema de Forno de Baixa Pressão. Adaptado de [Brown (1999)]

O forno está contido dentro de uma câmara pressurizada e selada, garantindo que todo o cadinho que contém o metal líquido está pressurizado. Os cadinhos utilizados dependem da liga que irá ser fundida: para ligas de alumínio são utilizados fornos de manutenção que apenas mantêm a liga quente, ligeiramente acima do ponto de fusão, sendo reabastecidos com metal fundido proveniente de outro forno de fusão; para ligas de cobre os fornos são alimentados com lingotes da liga que será utilizada, e funcionam como fornos de fusão e de manutenção [Engineering (2013)].

O tubo de alimentação é um gito vertical que vai buscar metal diretamente à parte inferior do banho de metal fundido, garantindo assim a melhor qualidade de metal utilizado, evitando possíveis escórias de superfície que possam haver no banho. Este tubo sobe verticalmente, encostando à coquilha para o vazamento. Esta boca superior do tubo é aquecida a gás para garantir que a sua temperatura não é baixa o suficiente para solidificar o metal à saída e assim assegurar as melhores condições de enchimento e solidificação possíveis [Brown (1999), Butler (2001)].

Podem ser utilizados diferentes tipos de moldações: tanto moldações com parte fixa e móvel (sendo que a parte fixa está em contacto constante com a boca superior do tubo de alimentação), ou então moldações completamente amovíveis, ficando a boca do alimentador exposta ao ambiente (como nos fornos para ligas de cobre observados na *CIFIAL* e fabricados pela *Induga-KWC Engineering* [Engineering (2013)]); em qualquer caso, as coquilhas necessitam de um pré-aquecimento, conseguido ao não deixar arrefecer abaixo de uma certa temperatura a coquilha do vazamento anterior. É também, em qualquer caso, aplicada uma camada de líquido, uma solu-

ção de grafite em água, por mergulho antes de cada novo vazamento, que cumpre a função de desmoldante, refrigerante e de lubrificante simultaneamente, com a moldação ainda quente após desmoldagem para este secar em filme nas paredes internas da moldação e não escorrer [Society (1984)].

Este revestimento da coquilha é fundamental para assegurar um bom vazamento, apresentado várias vantagens das quais se destacam:

- Prevenir soldadura da liga vazada à moldação; [Society (1984)]
- Melhorar a qualidade superficial da peça vazada; [Society (1984)]
- Lubrificar a cavidade moldante, facilitando a ejeção da peça; [Society (1984)]
- Providenciar isolamento para promover solidificação direcional; [Society (1984), B. Zhang (2007)]
- Ganhar um melhor controle sobre o coeficiente de transferência de calor na interface Coquilha - Peça; [Society (1984), D. R. Gunasegaram (2009)]

Estes revestimentos são, regra geral, uma suspensão de grafite coloidal em água sem sais minerais (de preferência destilada, e numa proporção de 8 a 10% de grafite em relação ao peso total da água), podendo ser aplicados ou por *spray* ou por mergulho, num banho em constante movimento (esta última tende a ser a mais comum). A grafite, para ser de boa qualidade, deverá conter, no mínimo, 75% de carbono e o seu banho deverá ter uma densidade entre 1,025 e 1,075, com uma temperatura nunca superior a 60°C (sendo que se verifica que a temperatura de 30°C é a que melhor promove a boa grafitização das coquilhas), atuando desta forma como lubrificante e prevenindo a "soldagem" das peças vazadas à coquilha. As coquilhas deverão estar a cerca de 150°C (no caso do vazamento dos latões) para promover a rápida evaporação da água [Fernando Portela de Castro (1996)].

Este mergulho, para além da aplicação do revestimento, serve outros dois propósitos [Society (1984)]:

1. A ação de ebulição da água com a superfície quente da moldação tende a provocar uma "explosão" que expõe os óxidos causados pela volatilização do zinco residual durante o vazamento (no caso do vazamento de latões);
2. A evaporação da água ajuda ao arrefecimento da moldação.

Os materiais com que são construídas as coquilhas variam consoante a liga que será vazada: para ligas de alumínio é comum utilizar-se aço para ferramentas de trabalho a quente (H11 ou H14), para grandes séries, e ferro fundido cinzento para pequenas séries; no caso das ligas de cobre, abordadas no presente trabalho, as coquilhas podem ser construídas em Ferro Fundido Cinzento perlítico de grão fino, em aços especiais para trabalho a quente ou aço C40, ou, no caso em estudo, em ligas de cobre-berílio ou, mais recentemente (devido ao efeito nefasto da exposição

prolongada aos vapores de berílio libertados pela coquilha quente) em ligas de cobre igualmente resistentes como as ligas de cobre-crómio [Society (1984), West (1982), Anders Persson (2004), Fernando Portela de Castro (1996)]. Os materiais utilizados para coquilhas são abordados na secção 2.3.1.3.

Graças às baixas velocidades de enchimento e boas condições de vazamento garantidas pela baixa pressão, é possível a obtenção de peças com geometrias intrincadas. A utilização de machos é, portanto, prática corrente. Estes são geralmente fabricados em areia, tanto para ligas de alumínio como para ligas de cobre, recorrendo à utilização de ligantes para manter a coesão da areia (um processo em tudo semelhante à construção de moldações para fundição em areia). O processo de construção dos machos e uma análise à sua contribuição para a qualidade das peças vazadas é mais aprofundado na secção 2.3.2.

O desenho e projeto das coquilhas é uma das principais características a ter em conta na qualidade das peças finais: a solidificação do metal vazado tem de ser direccional, na direção das extremidades para o alimentador, tendo em atenção as regras de traçado de peças fundidas comuns (com atenção especial à existência de zonas maciças, propensas à formação de rechupes e inclusões). Regra geral, e sendo este facto comprovado extensamente pela literatura, as zonas mais maciças devem ser as últimas a solidificar, garantindo sempre a boa alimentação de metal (assegurada pela pressão constante) [West (1982), Society (1984), Campbell (2003), Beeley (2001)].

O processo de enchimento é iniciado quando a moldação é fechada, ou quando a boca da moldação é encostada à boca do alimentador (com uma junção em forma de cone) e é inserido ar seco na câmara selada, aumentando a pressão desta, forçando o metal a subir pelo tubo vertical e preenchendo a cavidade da coquilha. As velocidades de enchimento obtidas por este processo são baixas (desde 0.1 até 10  $m/s$ ), garantindo o perfeito enchimento da moldação e, conseqüentemente e em conjunção com os restantes fatores (bom desenho da moldação, boa solidificação), ótimas propriedades mecânicas e de qualidade superficial e estética .

A existência de sensores na boca do tubo de alimentação e em várias zonas da moldação permite controlar o processo de enchimento e solidificação da peça, sendo que quando a solidificação chega à boca do tubo de alimentação da peça, é relaxada a pressão no interior da câmara de fundição, o metal, ainda líquido, desce pelo alimentador de volta ao cadinho e ao restante banho de metal, e a moldação é ou aberta (no caso de moldações com parte móvel e fixa), ou retirada (e posteriormente aberta e a peça retirada). A peça segue, no estado bruto de fundição, para os processos comuns de inspeção e finalização de peças fundidas, e a moldação é arrefecida até uma certa temperatura, sendo que depois o processo de vazamento se repete [Brown (1999), Butler (2001)].

Este é um processo extremamente simples de ser automatizado: as máquinas modernas de injeção por baixa pressão contêm PLC's (*Programmable Logic Controller's* , computadores baseados em lógica simples e em circuitos combinacionais, extremamente fáceis de programar e que apenas necessitam da ligação a um computador na fase da programação, sendo que é possível a partir de um único computador programar um número grande de PLC's) [Engineering (2013)] que podem ser programados com os parâmetros definidos pelo utilizador para cada liga, para cada

peça; as máquinas mais modernas apresentam braços robotizados que extraem a peça e a transportam para um tapete rolante (*conveyor belt*), e que movimentam, posicionam e abrem a coquilha. A sua fácil automatização é uma grande vantagem, dado que depois de uma pré-série inicial de ajuste de parâmetros práticos de fundição, é possível "abandonar" a máquina enquanto esta produz constantemente.

A cadência de produção depende de inúmeros fatores: dimensões das peças produzidas, liga vazada, grau de automatização do processo e qualidade necessária às peças finais (que influencia diretamente a velocidade de enchimento e, logo, o tempo de enchimento). Para peças grandes em alumínio pode não ser possível obter mais de 9 peças por hora [Brown (1999)], enquanto que para peças mais pequenas em ligas de cobre (por exemplo, torneiras) consegue-se obter um número muito superior, cerca de 30 a 40 peças por hora (segundo dados da CIFIAL). De acordo com a empresa fornecedora das máquinas, a capacidade máxima destas será de 450 peças num turno de 8 horas, o que dá aproximadamente 56 peças por hora [Engineering (2013)].

Como principais vantagens deste processo, além de quaisquer já referidas anteriormente, temos [Brown (1999), Butler (2001), F. Bonollo (2005), Zhang (2005)]:

- Facilidade de vazar peças de grande porte, pois graças à automatização do processo não é necessário envolver operadores a carregar pesos elevados (os *robots* fazem tudo);
- Ótima qualidade das peças vazadas, em termos de propriedades mecânicas, graças à baixa velocidade de enchimento, que evita inclusões gasosas e filmes de óxidos devido à ausência de turbulência;
- Poucas impurezas presentes na peça final, pois ao retirarmos metal do meio do cadinho (como se vê na figura 2.1) evitam-se as escórias presentes na superfície do banho;
- Boa rentabilidade de material, perdendo-se apenas entre 5 a 10 % de material fundido VS material na peça, levando a muito menos aparas e menos desperdício de material nos gitos e nos canais de alimentação (poupando-se também combustível que seria utilizado ao fundir de novo estes retornos (poupança irrisória));
- Como a solidificação é direccional, consegue-se garantir um bom enchimento da moldação apenas mantendo a pressão na câmara do forno;
- Extração da peça da moldação evita danos mecânicos neste, prolongando a sua vida útil;
- Permite a utilização de uma maior variedade de ligas, podendo ser usadas ligas que depois são sujeitas a tratamentos térmicos;
- Permite a utilização de machos não permanentes, geralmente em areia, o que leva a uma maior variedade de peças e geometrias que podem ser produzidas;
- Redução nos custos de maquinagem graças à quase ausência de gitos e alimentadores, como é o caso das jantes de automóvel;

- Possibilidade de vazar ligas em vácuo (na coquilha).

Relativamente às desvantagens observadas no processo [Brown (1999), Butler (2001), F. Bonollo (2005), Zhang (2005)]:

- Menor cadência de produção quando comparado com a fundição injetada por alta pressão;
- Desadequação a peças pequenas e pré-séries;
- Possibilidade de obter espessuras finas comparativamente à fundição em coquilha com vazamento por gravidade, mas sem comparação possível às espessuras obtidas com fundição injetada por alta pressão;
- É possível que hajam contaminantes introduzidos no banho metálico quando este é cheio de novo, que posteriormente podem dar origem a inclusões nas peças; além disso, quando a pressão é retirada e o metal cai no tubo de novo para o banho, gera-se turbulência no banho metálico e quaisquer impurezas e resíduos presentes na coquilha com que o metal tenha estado em contacto são inseridas no banho (é possível que ao introduzir um filtro de espuma cerâmica (SIVEX FC) no tubo de alimentação algumas destas impurezas sejam filtradas, garantindo a pureza da liga no vazamento [Brown (1999)]);
- Torna-se difícil controlar finamente a aplicação do desmoldante à moldação, o que origina falhas dimensionais; a distorção das moldações ao longo do tempo (devido à fadiga térmica, por exemplo) também afeta a precisão dimensional das peças.

Algumas peças tipicamente vazadas por fundição em baixa pressão são:

- Jantes de Automóvel (ligas de alumínio), de onde tem origem o processo;
- Cabeças de Cilindros (ligas de alumínio);
- Coletores de gases nos Motores (ligas de alumínio);
- Puxadores de Portas (ligas de alumínio);
- Torneiras (ligas de cobre);
- Componentes de tubagens (ligas de cobre).

Os parâmetros mais relevantes para o controlo deste processo, no vazamento de ligas de cobre, são [Society (1984)]:

1. Temperatura de Vazamento;
2. Velocidade de Vazamento;
3. Temperatura da Coquilha;
4. Tempo entre injeção e ejeção;

5. Tempo de Ciclo entre vazamentos;
6. Revestimento da Moldação (material, aplicação e respectivo coeficiente de transferência de calor).

## 2.3 Cobre e Ligas de Cobre

O Cobre é um metal avermelhado, com símbolo químico  $Cu$  e número atômico 29. Funde a  $1084^{\circ}C$ , tem uma densidade de 8,960 e uma massa específica de  $8960 \text{ kgm}^{-3}$ . Apresenta-se na forma cristalina com uma estrutura cúbica de faces centradas, sendo extremamente dúctil e maleável. É um ótimo condutor térmico e elétrico, e um constituinte base em inúmeras ligas utilizadas na indústria moderna de fundição. Na sua forma pura é extremamente difícil de trabalhar e vazar, sendo ainda um material muito propenso ao aparecimento de defeitos característicos. As ligas de Cobre surgiram com a adição de pequenas quantidades de elementos diferentes que pretendem melhorar as propriedades do cobre (especificamente para cada aplicação), conferindo-lhe novas propriedades físicas e mecânicas sem alterar drasticamente as propriedades base deste [International (1998)].

De entre as várias ligas de cobre salientam-se as ligas de cobre puro, latões (adição de Zinco) e bronzes (adição de Estanho), para além de ligas mais específicas e ligas especiais. As ligas de cobre inserem-se num sistema de classificação, de acordo com o intervalo de solidificação que têm, compondo três grandes grupos. O intervalo de solidificação é o intervalo de temperaturas desde que a liga começa a solidificar (abaixo do *liquidus*) até que a solidificação está completa (quando atinge o *solidus*). Os três grupos são [International (1998), Society (1984), West (1982)]:

- Grupo I

Ligas com um intervalo de solidificação curto,  $< 50^{\circ}C$ . Incluem-se aqui o cobre puro, ligas de cobre-crómio, bronzes de manganês e de alumínio, bronzes de níquel e os latões amarelos e monofásicos  $\alpha$ . O curto intervalo é causado pela ligação com grandes quantidades de elementos como Zinco, Alumínio ou Manganês, ou com pequenas quantidades de Crómio. Todos estes elementos oxidam facilmente, criando uma camada dura e insolúvel de óxidos. Logo, é neste grupo que tem de haver especial cuidado para não haver turbulência no vazamento que vá prender na peça estes óxidos.

- Grupo II

Ligas com um intervalo de solidificação médio,  $50^{\circ}C < I_s < 110^{\circ}C$ . Incluem-se aqui as ligas de cobre-berílio, cobre-níquel, latões e bronzes de silício e latões bifásicos  $\alpha + \beta$ . Também formam óxidos, mas não tão facilmente como no Grupo I.

- Grupo III

Ligas com um intervalo de solidificação grande,  $> 110^{\circ}C$ . Incluem-se aqui os latões com chumbo vermelhos e semi-vermelhos, bronzes com e sem chumbo, e bronzes com elevadas

quantidades de chumbo. Apresentam pouca tendência para oxidar, e podem sempre ser desoxidadas com fósforo.

## 2.3.1 Ligas Utilizadas

### 2.3.1.1 Latões

Os latões são ligas compostas maioritariamente por Cobre e Zinco, sendo uma liga em que os átomos de ambos os constituintes se podem substituir um ao outro dentro da mesma estrutura cristalina. Como se vê na figura 2.2, que apresenta o Diagrama de Fases para as ligas de Cobre e Zinco (Latões), há uma formação clara de várias fases, descritas na tabela 2.1.

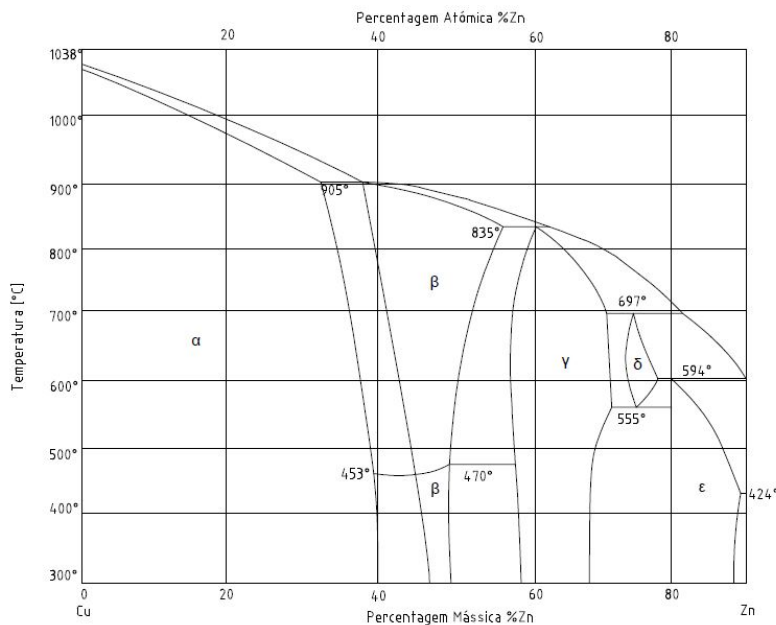


Figura 2.2: Diagrama de Equilíbrio de Fases para Latões. Adaptado de [Society (1984)].

É comum adicionar entre 1% a 3% de Chumbo aos latões *duplex* ( $\alpha + \beta$ ) para melhorar a sua maquinabilidade. Resultante da análise de microestruturas é possível constatar que o chumbo se deposita nas fronteiras de grão, apresentando-se na forma de partícula pretas longas, confundíveis por vezes com zonas negras que são porosidades. As fases  $\alpha$  são ligeiramente alongadas na direção da matriz  $\beta$ .



Tabela 2.1: Fases Presentes nos Latões [Society (1984), West (1982), International (1998), Fernando Portela de Castro (1996)]

Fase	Cobre (%)	Zinco (%)	Notas
$\alpha$	> 65	< 35	Solução sólida de Zinco no Cobre, com estrutura cristalográfica CFC, com valor máximo de Zinco de 39% a 454°C, caindo até 32,5% à temperatura peritética de 902°C e até 33% a 150°C. Ligas pouco duras, maleáveis e dúcteis, desde vermelhas até douradas (20% Zn) e amarelo polido com verde (30% Zn), apropriadas para o trabalho mecânico a frio;
$\alpha + \beta$	55 – 65	35 – 45	Latões <i>Duplex</i> ou Bifásicos, com estrutura cristalina CCC, com elevado valor de Zn que permite baixar o custo (comparando com cobre puro), e a presença da fase $\beta$ , que reduz a susceptibilidade à fissuração a quente; as melhores propriedades de vazamento são obtidas à custa de uma menor resistência à corrosão;
$\beta$	50 – 55	45 – 50	Composto intermetálico de Cobre e Zinco com estrutura cristalográfica CCC. Desordenada acima dos 460°C ( $\beta$ ) e ordenada abaixo desta temperatura ( $\beta'$ ). É uma fase dura abaixo dos 600°C, frágil e pouco dúctil. As ligas $\alpha + \beta$ são ocre ou douradas;
$\gamma$	< 50	> 50	Fase dura e frágil. Não é muito utilizada e só ocorre em ligas com grandes percentagens de Zinco;

É frequente falar do Equivalente de Zinco de um elemento no que toca ao efeito deste na formação de fases  $\alpha$  ou  $\beta$ : o equivalente de Zinco pode ser definido como o valor adicionado de Zinco no diagrama de equilíbrio de fases. Por exemplo, dizer que um elemento tem um equivalente de Zinco de 6 é o mesmo que dizer que, ao adicionar 1% desse elemento à liga, aumentamos a propensão para formação de fase  $\beta$  como se adicionássemos 6% de Zinco. Este teor fictício, ou equivalente de Zinco, pode ser definido recorrendo à expressão 2.1 [Fernando Portela de Castro (1996)]:

$$\%Zinco_{equiv} = \%Zn + 10 \times \%Si + 6 \times \%Al + 2 \times \%Sn + \%Pb + 0,9 \times \%Fe + 0,5 \times \%Mn - 1,2 \times \%Ni \quad (2.1)$$

O título fictício de um latão pode ser expresso através do seu título fictício em cobre, calculado a partir da expressão 2.2 [Fernando Portela de Castro (1996)]:

$$TF(Cu) = 100 \times \%Cu / (\%Cu + \%Zinco_{equiv} + 2 \times \%Mg) \quad (2.2)$$

Um título fictício de cobre elevado traduz uma liga mais dúctil, e um título mais baixo uma liga mais frágil. A variação das propriedades mecânicas de acordo com o título fictício de cobre é apresentada na figura 2.3:

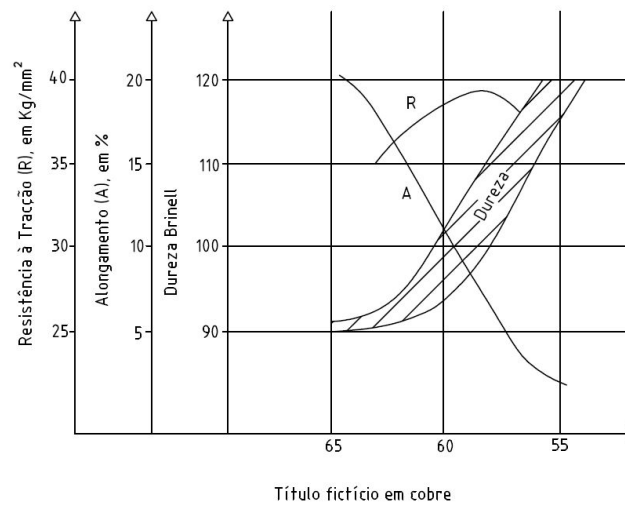


Figura 2.3: Variação das propriedades mecânicas dos latões vazados em coquilha de acordo com o título fictício de cobre. Adaptado de [Fernando Portela de Castro (1996)].

Segundo Fernando Portela de Castro (1996), o título fictício de cobre de um latão para vazamento em coquilha deve estar compreendido entre 58% e 61%. Tipicamente estes latões deverão apresentar propriedades mecânicas semelhantes às apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades Mecânicas Típicas de Latões Vazados em Coquilha [Fernando Portela de Castro (1996)] (\*conversão  $1 \text{ kg/mm}^2 = 9,8067 \text{ MPa}$ )

Resistência à tração ( $\text{MPa}^*$ )	275 a 333
Alongamento após rotura (%)	10 a 20
Dureza Brinell (HB)	70 a 80

Seguidamente irão ser referidos alguns dos elementos de liga utilizados nos latões e nas ligas de cobre em geral, contemplando também os seus efeitos nas propriedades mecânicas relevantes para o presente estudo.

**Zinco** Diminui, em latões bifásicos, a resistência à corrosão da liga, dependendo esta da quantidade de Zinco presente e da sua distribuição na microestrutura final [Society (1984)].

**Chumbo** Melhora a maquinabilidade do latão, atuando como um lubrificante entre a peça e a ferramenta, prevenindo também a formação de micro-rechupes ao depositar no espaço interdendrítico sob forma globular durante a solidificação, aumentando a sua impermeabilidade sob pressão; devido ao seu baixo ponto de fusão relativamente aos outros constituintes da liga ( $327^\circ\text{C}$ ), tende a migrar para as fronteiras de grão na solidificação, sendo praticamente insolúvel no cobre (0,04% a  $800^\circ\text{C}$ ) e nas ligas à temperatura ambiente.

Devido a restrições governamentais e ambientais, o chumbo tem vindo a ser banido da indústria no que toca a equipamentos para utilização por humanos (0,25% é o máximo admissível,

segundo as normas americanas) [Cal (2011), Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996), Junqueira (2007)].

Podemos observar a influência do chumbo comparando duas ligas muitíssimo semelhantes, as ligas C86400 e C86500, ambas *High Strength Yellow Brasses* (Latões Amarelos de Elevada Resistência), em que uma tem chumbo e a outra não. A comparação entre estas é apresentada na tabela 2.3.

Tabela 2.3: Comparação entre duas ligas para evidenciar o efeito do chumbo nas propriedades mecânicas. Adaptado de [Society (1984)]. Conversão de *ksi* para *MPa* utilizando uma relação de  $1ksi \approx 6,8948MPa$

	Composição	
	C86400	C86500
Cu	58	58
Al	1	1
Fe	1	1
Mn	0,5	0,5
Pb	1	-
Zn	38,5	39,5
Propriedades Mecânicas		
Tensão de Ruptura (MPa)	414	448
Tensão Limite Elástico (MPa)	138	172
Extensão após ruptura (%)	15	20
Intervalo de Solidificação		
°C	880-862	880-862

**Antimônio e Arsênio** Inibem a corrosão da fase  $\alpha$  e aumentam a resistência à dezincificação (principalmente o Arsênio), mas devido a restrições ambientais a sua presença está limitada a 0,05% [Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996), Junqueira (2007)].

**Alumínio e Silício** Em pequenas concentrações melhoram a resistência à corrosão da liga e a resistência mecânica. Ambos são desoxidantes poderosos e ajudam tanto a minimizar depósitos nas superfícies da moldação como a melhorar a colabilidade da liga [Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996)].

Em ligas 60/40 (latões extensamente utilizados na indústria de canalizações e acessórios para estas, com 60%Cu+40%Zn), valores de Alumínio superiores a 1% causam maior tendência à formação de rechupes e formação de fase  $\beta$  (pois o equivalente de Zinco do Alumínio é de 6). A ductilidade da liga também é afetada, devendo o valor de Alumínio ser de 0,5% para a ductilidade máxima. No entanto é um elemento responsável pela desoxidação das ligas e redução das perdas de zinco por evaporação [Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996)].

O Silício torna a liga mais fácil de vaziar, mas mais difícil de maquinar, e tem um equivalente de Zinco de 7 segundo [Society (1984)] e de 10 segundo [Fernando Portela de Castro (1996)], sendo em qualquer dos casos um forte estabilizador da fase  $\beta$  [Junqueira (2007)].

**Manganês** Reduz o ponto de fusão das ligas e é utilizado como desoxidante; aumenta a resistência mecânica das ligas e também a quantidade de ferro que pode ser introduzida [Society (1984)]. No entanto, para teores superiores a 1%, o latão torna-se demasiado duro e difícil de maquinar [Fernando Portela de Castro (1996)].

**Níquel** Melhora as propriedades mecânicas da liga e pode prevenir a segregação do chumbo nas fronteiras de grão, entre valores de 1% a 2% [West (1982)]. Ajuda também a refinar o tamanho de grão da liga quando solidifica [Society (1984)], podendo também melhorar, ligeiramente, a resistência à corrosão da liga. A combinação deste elemento com o Alumínio precipita Aluminetos de Níquel, que endurecem a liga, reduzindo, no entanto, a sua maquinabilidade [Fernando Portela de Castro (1996)]. Curiosamente, é dos poucos elementos que apresenta um equivalente de Zinco negativo (de -1,1 a -1,7), promovendo a fase  $\alpha$ . Apresenta alta solubilidade em latões binários e, com teores entre 3% e 4%, melhora as características mecânicas da liga e a sua resistência à corrosão [Junqueira (2007)].

**Ferro** Aumenta a resistência mecânica da liga e promove o refinamento de grão desta [Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996)], melhorando assim a resistência à tração e a ductilidade. No entanto o Ferro é um dos elementos responsáveis pela formação de "pontos duros", silicetos de ferro que surgem da associação do ferro com o silício, que irão acarretar defeitos e imperfeições aquando da maquinagem e polimento das peças. É muito pouco solúvel em latões (0,5%) e apresenta um equivalente de Zinco de 0,9 (portanto, estabilizador da fase  $\beta$ ). É de notar que teores superiores a 0,2% ajudam à solubilidade do chumbo na matriz, graças ao efeito refinador de grão do ferro. [Junqueira (2007)].

**Estanho** Aumenta a resistência à corrosão da liga, melhorando desta forma a resistência à corrosão da fase  $\alpha$  e isolando a fase  $\beta$ ; melhora a resistência à dezincificação das ligas, melhorando também ligeiramente as propriedades mecânicas. A sua solubilidade é condicionada pelo teor de Zinco, diminuindo com o aumento deste. No entanto, valores acima de 0,8% reduzem consideravelmente a extensão após rotura, e valores superiores a 0,45% levam a uma elevada fragilidade a quente e tendência a fissuração a quente; em fundição o valor máximo aconselhado de Estanho é de 0,3 % [Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996), Junqueira (2007)]. Segundo [A. La Fontaine (2006)], a adição de estanho previne a segregação de Bismuto (um dos substitutos do Chumbo nas ligas amigas do ambiente) nas fronteiras de grão.

**Bismuto** É um elemento cada vez mais utilizado como recurso ao Chumbo, em teores de 1,2% a 1,4%, pois é virtualmente não tóxico, recriando as propriedades benéficas do Chumbo nas ligas.

Reduz minimamente a condutividade do cobre, mas este efeito é contrariado com a adição de pequenas doses de Lítio, que se liga ao Bismuto formando  $BiLi_3$  [West (1982), Fernando Portela de Castro (1996), A. La Fontaine (2006), Junqueira (2007)].

Relativamente à utilização de Bismuto como substituto do Chumbo nos latões é importante referir o estudo realizado por A. La Fontaine *et al.* em 2006, em que dois latões com composições químicas semelhantes (apresentadas na tabela 2.4), um com chumbo e outro sem, são examinados.

Tabela 2.4: Composição nominal e medida num latão convencional (C84400) e num latão sem chumbo (C89520) [A. La Fontaine (2006)]

	C84400		C89520	
	Nominal	Medido	Nominal	Medido
Cu	81	80,8	85 - 87	86,5
Sn	3	2,9	4 - 9	5,2
Pb	7	6,3	0,25	0,1
Zn	9	9,4	2 - 6	5
Bi	-	-	1,5 - 2,5	1,4
Se	-	-	0,8 - 1,2	0,8
Ni	1	0,55	1	0,2

Neste artigo concluem que:

- O tamanho de grão aumenta consideravelmente (cerca de 10 vezes) no latão sem chumbo, o que pode ser explicado pela elevada sensibilidade do tamanho de grão às mudanças de composição da liga;
- A concentração excessiva de estanho dá origem a "*coring*", um fenómeno já conhecido, onde se origina uma concentração excessiva do estanho à volta das partículas e nas fronteiras de grão;
- No entanto, há um aumento da maquinabilidade da liga, uma vez que a existência deste "*coring*" previne a segregação do Bismuto nas fronteiras de grão (sendo este o principal objetivo ao introduzir o Bismuto como substituto do Chumbo).

Pelas razões acima referidas, conclui-se que o Bismuto pode, sob certas condições e com um laborioso processo de afinação de liga, atuar como um competente substituto do Chumbo nos latões.

**Fósforo** Apresenta um efeito semelhante ao arsénio, aumentando a resistência à dezincificação dos latões [Fernando Portela de Castro (1996), Junqueira (2007)].

**Magnésio** Atua como um potente desoxidante, sendo um forte estabilizador da fase  $\beta$  com um equivalente de Zinco de 2. Apresenta alguma solubilidade no estado sólido, melhora significativamente as propriedades mecânicas da liga (sobretudo a sua resistência a esforços mecânicos e à

corrosão), promove a solubilidade do ferro nas ligas e a do alumínio em ligas de elevada resistência mecânica. Altera também a coloração da liga, tornando-a mais clara [Fernando Portela de Castro (1996), Junqueira (2007)].

Na *CIFIAL*, como foi referido anteriormente, fundem-se torneiras de latão pelo processo de fundição por baixa pressão. As torneiras são vazadas para moldações metálicas permanentes e móveis, sendo utilizadas máquinas da *Induga KWC-Engineering* para fusão, manutenção e vazamento da liga. Nas secções seguintes são analisadas as ligas implementadas pela empresa para as torneiras e nas coquilhas utilizadas.

### 2.3.1.2 Ligas Utilizadas para Torneiras

Apesar de, atualmente, a *CIFIAL* vazar as torneiras numa liga de latão "amarelo"(teor de Zinco >30%) baseada na liga genérica 60/40 referida anteriormente, até há cerca de 2-3-4 anos fundiam uma liga com Chumbo, perfeitamente afinada para conseguir as melhores propriedades mecânicas. A constituição da liga com Chumbo é apresentada seguinte tabela, 2.5:

Tabela 2.5: Liga com Chumbo utilizada na *CIFIAL*

Mat.	Vol	%Cu	%Pb	%Bi	%Zn	%Al	%Fe	%Ni	%Sn	%Mn	%As	%Si	%Fe+Sn
c/ Pb	Mín	59	1,2	-	Rest	0,55	0,05	-	-	-	-	-	-
	Máx	60	1,6	0,1		0,62	0,15	0,1	0,2	0,01	0,03	0,02	0,32

Como se vê, os valores de Chumbo presentes na liga não estão de acordo com os novos limites impostos pelas normas Americanas (principal mercado da *CIFIAL*) de 0,25%.

Assim sendo, foi desenvolvida uma nova liga que substitui o chumbo por maiores percentagens de Cobre e de Bismuto, com alterações mínimas nas percentagens de Alumínio, Ferro, Manganês e Silício. A composição da liga sem chumbo, utilizada atualmente, é apresentada na seguinte tabela, 2.6.

Tabela 2.6: Liga sem Chumbo utilizada na *CIFIAL*

Mat.	Vol	%Cu	%Pb	%Bi	%Zn	%Al	%Fe	%Ni	%Sn	%Mn	%Si	%Fe+Sn
s/ Pb	Mín	60	-	0,6	Rest	0,5	-	-	-	-	-	-
	Máx	61,5	0,1	0,8		0,7	0,2	0,1	0,2	0,03	0,05	0,35

Calculando as respetivas percentagens de Zinco equivalente (através da expressão 2.1) e títulos fictícios para ambas as ligas (recorrendo à expressão 2.2), obtemos os seguintes valores:

$$\%Zinco_{equivalente_{Pb}} = 42,76\% \quad (2.3)$$

$$TF(Cu)_{Pb} = 58,388 \quad (2.4)$$

$$\%Zinco_{equivalente} = 41,25\% \quad (2.5)$$

$$TF(Cu) = 59,857 \quad (2.6)$$

Estes parâmetros permitem-nos comentar *a priori* os efeitos que a mudança de liga terá nas propriedades das peças vazadas: a diminuição do teor de Zinco equivalente, de 42,76% (expressão 2.3) para 41,25% (expressão 2.5), e o consequente aumento do título fictício de 58,388 (expressão 2.4) para 59,857 (expressão 2.6) permitem-nos afirmar (suportando as afirmações pelo gráfico apresentado em 2.3) que, na liga sem chumbo:

- a) a dureza irá ser menor;
- b) a extensão será maior; e
- c) a resistência à tração será menor.

Quanto ao efeito dos elementos de liga, podemos concluir que, teoricamente, a diminuição da percentagem de Chumbo pode comprometer a maquinabilidade da liga, mas ao mesmo tempo não baixar tanto a sua resistência à tração; o aumento na percentagem de Alumínio iria melhorar marginalmente a resistência à corrosão, enquanto que fragilizava a liga; o aumento da percentagem de Ferro tende a melhorar as propriedades mecânicas da liga, mas, em conjunção com o aumento de Silício, pode dar origem a siliceto de ferro, um constituinte muito duro que comprometerá a maquinabilidade da liga ; o aumento de Manganês na liga irá melhorar a sua resistência mecânica e promover a desoxidação desta; e por fim, o aumento de Silício tende a endurecer a liga devido ao facto de ser um elemento betagénio (estabilizador da fase  $\beta$ ), podendo também criar os já referidos silicetos de ferro e outros compostos duros em conjunção com o Manganês, que irão baixar a maquinabilidade da liga [Fernando Portela de Castro (1996)].

Apresenta-se, na página seguinte, uma tabela (Tabela 2.7) com várias ligas utilizadas na indústria de torneiras e de canalizações, com as respetivas composições e cálculo de Títulos Fictícios ( $TF(Cu)$ ). É ainda apresentada uma tabela (Tabela 2.8) com as propriedades mecânicas das várias ligas referidas na tabela 2.7, sendo que as respetivas fontes bibliográficas são as mesmas.

Tabela 2.7: Comparação da composição química entre vários latões e bronzes utilizados na indústria de torneiras e canalizações.

Elementos Químicos	Ligas												
	s/ Pb (1)	c/ Pb (2)	C84400	C89325	C89831	C89833	C89835	C89844	GROHE PT	C85800	CuZn37	CuZn40	
Cu	61,5	60	78 - 82	84 - 88	87 - 91	86 - 91	85 - 89	83 - 86	59,5 - 60	61,5	62 - 65,5	58 - 64	
Pb	0,1	1,6	6 - 8	0,1	0,1	0,09	0,05	0 - 0,2	1,5 - 1,7	1	0,1	0 - 2,5	
Bi	0,8	0,1	-	2,7 - 3,7	2,7 - 3,7	1,7 - 2,7	1,75 - 2,75	2 - 4	0,005	-	-	-	
Zn	Rest.	Rest.	7 - 10	1	2 - 4	2 - 6	2 - 4	7 - 10	Rest.	36	Rest.	Rest.	
Al	0,7	0,62	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0 - 0,005	0,65 - 0,7	0,55	0,05	0 - 1	
Fe	0,2	0,15	0,4	0,15	0,3	0,3	0,2	0 - 0,3	-	0,5	0,1	0,8	
Ni	0,1	0,1	1	1	1	1	1	0 - 1	0,2	0,5	0,3	1	
Sn	0,2	0,2	2,3 - 3,5	9 - 11	2,7 - 3,7	4 - 6	6 - 7,5	3 - 5	-	1	0,1	1	
Mn	0,03	0,01	-	-	-	-	-	-	0,002	0,25	-	1	
As	-	0,03	-	-	-	-	-	-	0,002	0,05	-	-	
Si	0,05	0,02	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0 - 0,005	0,01	0,25	-	0,5	
Fe+Sn	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-	0,3	-	-	-	
Sb	-	-	0,25	0,5	0,25	0,25	0,35	0 - 0,25	-	0,05	-	-	
P	-	-	1,5	0,1	0,05	0,05	0,1	0 - 0,05	0,01	0,01	-	-	
S	-	-	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0 - 0,08	-	0,05	-	-	
Se	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	0,005	-	-	-	
%Zn <sub>req</sub>	41,25	42,76	20,54	20,12	8,65	14,24	16,11	16,18	42,58	44,78	34,18	39,47	
TF(Cu)	59,86	58,39	79,57	81,04	91,14	86,14	84,38	83,93	58,39	57,87	65,10	60,71	

As ligas s/Pb (1) e c/Pb (2) foram divulgadas pela *CIFIAL*; as ligas C84400, C89325, C89831, C89833, C89835 e C89844 foram consultadas no catálogo [[Concast \(2014\)](#)]; a liga da GROHE PT foi consultada na tese [[Castro \(2008\)](#)]; a liga C85800 foi consultada em [[ces \(2013\)](#)], [rhe \(2014\)](#)]; a liga CuZn37 foi consultada em [[lam \(2013\)](#)]; a liga CuZn40 foi consultada em [[nor \(1979\)](#)].



Tabela 2.8: Propriedades mecânicas das várias ligas cujas composições foram apresentadas na tabela 2.7. Referências bibliográficas iguais às da tabela mencionada, exceto quando indicadas.

Propriedades	Ligas												
	s/Pb (1)	c/Pb (2)	C84400	C89325	C89831	C89833	C89835	C89844	GROHE PT	C85800	CuZn37	CuZn40	
Tensão Limite de Resistência à Tração (MPa)	-	-	207	207	200	206,8	206,8	193	-	360-400 [ces (2013)]; 379 [rhe (2014)]	-	-	
Tensão de Ruptura (MPa)	-	-	103	82,7	89,6	96,5	96,5	89,6	-	200-220 [ces (2013)]; 207 [rhe (2014)]	-	280	
Módulo de Elasticidade (GPa)	-	-	89,6	-	-	-	-	89,6	-	91,1-92,9 [ces (2013)]; 103 [rhe (2014)]	110	-	
Extensão após ruptura (%)	-	-	16	4	5	6	6	5	-	10-20 [ces (2013)]; 15 [rhe (2014)]	-	15	
Condutividade Térmica (a 20°C) (W/mK)	87,5	-	72,4	-	-	-	-	80,9	-	80,5-87,3 [ces (2013)]	120	117	
Índice de Maquinabilidade	-	-	90	80	85	81	70	70	-	-	-	-	
Densidade (a 20°C) (g/cm <sup>3</sup> )	7,95	-	8,69	8,94	8,8	8,8	8,9	8,58	-	7,92-8,08 [ces (2013)]	8,44	8,4	
Dureza (HV)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60-70 [ces (2013)]	-	100	
Temperatura de Fusão - Líquidus (°C)	914	-	1004	-	-	-	-	1010	-	902 [ces (2013)]; 899 [rhe (2014)]	920	920	
Temperatura de Fusão - Sólidus (°C)	786	-	843	-	-	-	-	853	-	882 [ces (2013)]; 871 [rhe (2014)]	902	900	
Intervalo de Solidificação (°C)	128	-	161	-	-	-	-	157	-	20 [ces (2013)]; 28 [rhe (2014)]	18	20	

### 2.3.1.3 Ligas Utilizadas para Moldações e Coquilhas

O vazamento de ligas de cobre, nomeadamente dos latões, é efetuado em moldações de areia ou metálicas (permanentes). No caso das moldações metálicas podem-se distinguir 3 tipos de moldações utilizadas atualmente:

- Ferro Fundido Cinzento perlítico de grão fino (para latões com baixo ponto de fusão e bronzes de silício) [Society (1984)];
- Aços Especiais e de médio teor em carbono (como o aço C40) [Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996)];
- Ligas de Cobre Berílio [Society (1984), Fernando Portela de Castro (1996), Domingos Granja (2003)];

Atentando no aço C40, este é frequentemente utilizado no fabrico de caixas de machos. É facilmente maquinável e a sua longevidade, quando utilizado em caixas de machos, é elevado (entre 50.000 a 100.000 utilizações) [Fernando Portela de Castro (1996)]. Quando utilizado para coquilhas de vazamento de ligas tem uma duração mais curta (entre 20.000 a 30.000 vazamentos), e as suas características deterioram-se devido a vários fatores [Fernando Portela de Castro (1996)]:

- Aparecimento de fissuras criadas devido à fadiga térmica;
- Alterações dimensionais, causadas pelo desgaste erosivo;
- Corrosão atmosférica (oxidação).

Estas desvantagens são superadas quando se utilizam moldações fabricadas em ligas de Cobre Berílio (como na *CIFIAL*). As coquilhas fabricadas nestas ligas apresentam uma longevidade muito superior às fabricadas em aço (entre 80.000 e 200.000 vazamentos), além de apresentarem uma ótima condutividade térmica (fundamental para garantir o arrefecimento direccional necessário quando se vazam ligas de cobre), cerca de duas vezes superior à do Alumínio e quatro a dez vezes superior à dos aços [Domingos Granja (2003)], e de poderem ser tratadas termicamente para conferir elevados módulos de elasticidade e boa resistência à corrosão [West (1982)]. Algumas vantagens inerentes à utilização destas ligas são [Fernando Portela de Castro (1996), Domingos Granja (2003)]:

- Menor tendência à fissuração por fadiga térmica;
- Superior estabilidade dimensional;
- Boa resistência à oxidação (são fáceis de revestir com grafite);
- Conferem bom aspeto superficial às peças vazadas;

No que toca a desvantagens das ligas de cobre berílio temos, principalmente, o facto de que o berílio ser extremamente tóxico quando inalado sob a forma de vapor (sendo considerado um elemento cancerígeno e altamente agressivo para os pulmões)[Greenfield (1971), for Research on Cancer], a dificuldade da reparação das coquilhas e o seu custo elevado.

Podemos agrupar as ligas de cobre utilizadas para moldações do modo apresentado na tabela 2.9:

Tabela 2.9: Ligas de cobre, composição química e propriedades. Adaptado de [Domingos Granja (2003)]

Normas		Composição Química % (Valor Médio)					
DIN	UNS	Be	Co	Cr	Si	Ni	Outros
2,1247 (CuBe2)	C17200	2,00	0,40	-	-	-	Cu
2,1285 (CuCoBe)	C17500	0,50	1,00	-	-	1,00	Cu
CuNi2Si	C1800	-	-	-	0,70	2,40	0,5+Cu
2,1293 (CuCrZr)	-	-	-	0,75	-	Zr 0,08	Cu

Para vazar ligas de Cobre à pressão atmosférica recomendam-se as ligas 2,1285 (CuCoBe), CuNi2Si e 2,1293 (CuCrZr) [Domingos Granja (2003)].

A liga utilizada para coquilhas na *CIFIAL* é uma liga comparável à liga 2,1285 (CuCoBe), com a designação EN CuCo1Ni1Be e a seguinte composição química (%), apresentada na tabela 2.10:

Tabela 2.10: Composição Química da Liga Utilizada nas Coquilhas na *CIFIAL* [sch]

Co	Ni	Be	Fe	Si	total outros	Cu
0,8 - 1,3	0,8 - 1,3	0,4 - 0,7	máx. 0,2	máx. 0,2	0,5	Rest.

Tentando minimizar o efeito tóxico da liga Cu-Be sobre os operadores, a curto e a longo prazo, tem-se notado uma tendência gradual para a mudança de ligas de Cobre Berílio para ligas de Cobre Crómio, à custa de uma vida útil inferior às primeiras.

O fabrico das coquilhas é efetuado recorrendo a maquinagem CNC de precisão, a partir de ficheiros CAD/CAM.

Devido à grande taxa de contração destas (desde 12 a 15 %), as coquilhas são utilizadas estando quase frias (entre 100 a 150°C) [Fernando Portela de Castro (1996)].

As regras comuns de traçado, projeto de sistemas de alimentação e de gitagem aplicam-se às coquilhas para fundição de ligas de cobre. É importante garantir uma alimentação de metal líquido contínua e adaptada aos requisitos da moldação e da liga a vazar, tendo atenção ao processo de fundição utilizado; a saída do ar presente na cavidade deve ser contínua e simples, de modo a não causar pressões extra que possam prejudicar o vazamento do metal, que deve ser efetuado em regime laminar para garantir boas qualidades superficiais, garantir a isenção de filmes de óxidos e conferir as melhores características mecânicas à peça final [Fernando Portela de Castro (1996), Society (1984)].

### 2.3.2 Utilização de Machos

Para a criação das cavidades internas bem definidas (fulcrais nas torneiras em latão, em estudo) é comum a utilização de machos de areia fabricados pelo processo de "hot box" (caixa quente). Na receita sugerida por [Fernando Portela de Castro (1996)], consta a adição de 2% de resina (que atua como ligante) e 0,1% de catalisador, com quantidades variáveis de aditivo conservante, misturando tudo durante 5 a 8 minutos. Caso não seja possível desagregar os machos com as mãos, significa que contêm excesso de resina e não poderão seguir para a fundição pois tal significará que não se irão desfazer facilmente depois de vazadas as peças. Devem ser utilizados frios para que não libertem gases durante o vazamento, o que pode originar defeitos superficiais (tais como *Blowholes*, que são causados por excesso de humidade na areia, que é evaporada quando em contacto com o metal líquido [of British Foundrymen (1961)]).

Apresenta-se na página seguinte uma tabela (tabelas 2.11 e 2.12) retirada de [Fernando Portela de Castro (1996)] que é considerada relevante no que toca aos defeitos comuns na utilização de machos em areia na fundição.

Tabela 2.1.1: Defeitos mais usuais na fabricação de machos em areia (Parte I) [Fernando Portela de Castro (1996)]

Defeitos	Causas	Acção
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Macho Incompleto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bicos entupidos</li> <li>● Falta de areia na camisa de sopragem</li> <li>● Fugas de Areia</li> <li>● Canais de Enchimento apertados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Desentupir os bicos</li> <li>● Encher camisa</li> <li>● Deitar sabão ou borracha</li> <li>● Verificar se a régua de enchimento está bem nivelada</li> <li>● Alargar canais de enchimento</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Partes não desmoldadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ferramenta fria</li> <li>● Queimadores apagados</li> <li>● Primeiros machos de uma ferramenta limpa</li> <li>● Contra-saída</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Aumentar temperatura</li> <li>● Reacender queimadores</li> <li>● Efetuar mais alguns ciclos</li> <li>● Verificar ferramenta</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Macho com fenda ou buracos na junta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Diferença de temperatura demasiado grande entre a parte superior e a inferior criando uma fuga de ar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Alterar as temperaturas de aquecimento</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Macho mal compactado em geral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Falta de refrigeração</li> <li>● Areia muito velha</li> <li>● Válvula de sopragem suja</li> <li>● Membrana de sopragem ou de escape estragada</li> <li>● Mistura mal concebida na preparação do macho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Verificar sistema de refrigeração</li> <li>● Limpar tremonha/camisa</li> <li>● Limpar válvula</li> <li>● Mudar membrana</li> <li>● Verificar quantidades de aditivos</li> </ul>

Tabela 2.12: Defeitos mais usuais na fabricação de machos em areia (Parte II) [Fernando Portela de Castro (1996)]

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macho partido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deficiente cozimento</li> <li>• Ferramenta fria</li> <li>• Areia muito velha</li> <li>• Ejetores desencontrados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alterar tempo de cozimento</li> <li>• Aquecer ferramenta</li> <li>• Esvaziar tremonha/camisa</li> <li>• Regular ejetores</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prensaos partidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramenta fria</li> <li>• Queimadores apagados</li> <li>• Altura do tapete muito baixa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aquecer ferramenta</li> <li>• Reacender queimadores</li> <li>• Subir tapete</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Machos partidos (no coração)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bicos muito compridos</li> <li>• Diâmetro do bico não conforme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encurtar bicos</li> <li>• Mudar bicos</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macho de cor carregada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura muito elevada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alterar aquecimento</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Queda" de machos na abertura das caixas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gordura nos canais de enchimento</li> <li>• Fixadores obstruídos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpar canais</li> <li>• Verificar fixadores</li> </ul>

### 2.3.3 Defeitos Comuns na Fundição

A fundição de peças acarreta numerosos defeitos inerentes ao processo, qualquer que este seja (fundição injetada a alta pressão, fundição em coquilha por gravidade, fundição a baixa pressão, fundição em coquilha rotativa, fundição por cera perdida, ...). O cenário perfeito seria o de vaziar peças sem quaisquer defeitos e com uma taxa de aprovação de 100%; tal é praticamente impossível, pois os defeitos têm diversas causas e é impossível minimizar ou eliminar umas sem comprometer as outras. O *trade-off* feito na indústria é o de minimizar os defeitos fulcrais para o bom funcionamento da peça (por vezes "empurrando-os" para zonas não vitais) ao invés de despendar largas quantidades de tempo, dinheiro e investigação a procurar eliminá-los.

A abordagem ao problema dos defeitos deve sempre ser feita tendo em conta uma perspetiva económica: é necessário analisar o defeito e decidir se o mais rentabilizável para cada situação é preveni-lo (alterando a geometria da peça, da coquilha, dos machos, do sistema de alimentação, ...) ou tratá-lo quando este surge (maquinagem, operações de acabamento, ...).

Peter Beeley agrupa, em [Beeley (2001)], os defeitos que surgem nas peças fundidas em 7 grupos distintos, definidos segundo as suas origens nas peças. São eles:

1. Defeitos de forma e geometria que surgem no vazamento
2. Inclusões geradas pela areia
3. Defeitos gasosos
4. Contrações devidas a contrações volumétricas que ocorrem na solidificação do material
5. Contrações que ocorrem depois da solidificação
6. Erros dimensionais
7. Erros de composição e segregação da liga

Outros autores, nomeadamente Fernando Portela de Castro (em [Fernando Portela de Castro (1996)]), agrupa os defeitos em 7 classes de acordo com as classificações do Comité Internacional das Associações Técnicas de Fundição, sendo elas:

1. Excrescências metálicas
2. Cavidades
3. Defeitos de continuidade
4. Defeitos de superfície
5. Formas incompletas
6. Dimensões ou formas incorrectas
7. Inclusões e anomalias estruturais

O autor divide depois cada classe em grupos e cada um destes grupos em sub-grupos. A classificação completa é apresentada na tabela [2.13](#), apresentada na página seguinte.



Tabela 2.13: Classificação dos defeitos de fundição em coquilha [Fernando Portela de Castro (1996)]

Classe	Grupo	Sub-Grupo
1 Excrescências metálicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rebarbas</li> <li>• Fendas na Coquilha</li> <li>• Macho deslocado ou partido</li> </ul>	
2 Cavidades	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poros</li> <li>• Novelos</li> <li>• Rechupes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficiais</li> <li>• Interiores</li> <li>• Com contato com o exterior</li> <li>• Sem contato com o exterior</li> <li>• de ângulo</li> </ul>
3 Defeitos de Continuidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fraturas a quente</li> <li>• Fraturas a frio</li> <li>• Fendas (rachadelas)</li> <li>• Mal ligado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• de ângulo</li> <li>• de superfície</li> <li>• Gota fria</li> <li>• Retoma</li> </ul>
4 Defeitos de Superfície	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rugosidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localizada</li> <li>• Distribuída</li> <li>• Penetração</li> <li>• Marca de enchimento</li> </ul>
5 Formas Incompletas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enchimento Incompleto</li> <li>• Enchimento Interrompido</li> <li>• Saída de metal para fora da coquilha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pela apartação</li> <li>• através do macho</li> </ul>
6 Dimensões ou Formas incorrectas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empenos</li> <li>• Dimensões incorretas</li> <li>• Desencontros</li> </ul>	
7 Inclusões e anomalias estruturais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclusões metálicas</li> <li>• Inclusões não metálicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gotas de Metal</li> <li>• Pontos Duros</li> <li>• Inclusões de escória</li> <li>• Inclusões de areia</li> <li>• Inclusões de grafite</li> <li>• Pele de óxidos</li> </ul>

De seguida serão abordados alguns dos defeitos comuns na fundição de peças.

Podem-se identificar defeitos que têm origem no projeto ou na geometria da peça e que surgem no vazamento:

**Misrun ou Short-Run** Ocorre quando uma zona da peça não é cheia, logo não foi gitada corretamente [Beeley (2001)].

**Cold Laps** Ocorre quando o metal não corre livremente na superfície da moldação e estas intermitências tornam-se visíveis na solidificação [Beeley (2001)].

**Cold Shuts** Quando o metal solidifica e há grandes descontinuidades devido à incoerência de diferentes fluxos líquidos, originam-se estas falhas de grandes dimensões [Beeley (2001)].

Os 3 defeitos referidos acima são geralmente associados à temperatura de vazamento do metal, quando este é vazado a uma temperatura demasiado baixa e por isso não apresenta a fluidez e vazabilidade necessárias. Podem também ser causados por excesso de arrefecimento da moldação ou quando vazados em areia com um elevado nível de humidade [Beeley (2001)]. Na tabela 2.14 apresentam-se algumas causas e correções possíveis.

Tabela 2.14: Causas e Correções para Metal mal ligado [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Metal mal ligado: <i>Misruns, Cold Laps, Cold Shuts</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● vazamento interrompido</li> <li>● temperatura demasiado baixa</li> <li>● basculamento demasiado lento</li> <li>● sistema de gitagem desequilibrado, provocando fluxos de metal opostos, e que se encontram a temperatura insuficiente para se homogeneizarem na superfície de contato</li> <li>● temperatura da coquilha demasiado baixa</li> <li>● solidificação prematura</li> <li>● película de alumina interposta no metal</li> <li>● respiros insuficientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● assegurar o vazamento contínuo do metal para a coquilha</li> <li>● elevar a temperatura do vazamento</li> <li>● bascular mais rapidamente</li> <li>● modificar sistema de gitagem</li>   <li>● não deixar que a coquilha arrefeça tanto</li>   <li>● pintar a coquilha com um banho de grafite mais concentrado</li> <li>● verificar dimensionamento dos respiros</li> </ul>

Uma imagem que ilustra um defeito de falha de ligação de metal é apresentada na figura 2.4:



Figura 2.4: Peça mal ligada [Fernando Portela de Castro (1996)]

Quanto a inclusões e defeitos presentes na areia, podem-se dividir em dois sub-grupos [Beeley (2001)]:

- Indígenas ou Endígenas: produto de reações dentro do metal, por exemplo, pequenas partículas que ficam suspensas no banho metálico, etc . . . ; apresentam-se dispersas nas peças;
- Exógenas: produto de inclusões não-metálicas durante o vazamento, tais como escória e partes da moldação ou dos machos; apresentam-se em zonas concentradas nas peças.

A tabela 2.15 é referente a inclusões de areia nos latões fundidos, um tipo de defeito muito comum na fundição em coquilha de ligas de latão.

Tabela 2.15: Causas e Correções para Inclusões de Areia [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Inclusões de Areia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• destacamento da areia dos machos devido à deficiente confeitura destes</li> <li>• machos mal cozidos</li> <li>• escoamento turbulento do fluxo de metal</li>   <li>• ausência de respiros nas caixas de machos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• melhorar as condições de confeitura dos machos, nomeadamente no que toca ao controlo das percentagens de aditivos e das temperaturas de cozedura</li> <li>• corrigir o traçado dos sistemas de gitagem e de alimentação, evitando curvas apertadas, arestas, mudanças bruscas de direção ou projeções de metal contra as paredes dos machos</li> <li>• incluir respiros para gases nas caixas de machos</li> </ul>

Como se vê na imagem 2.5, o efeito das inclusões de areia numa peça é evidente e resulta em más condições de funcionamento das peças.



Figura 2.5: Esquerda: Peça com inclusões de areia devido à má compactação dos machos; Direita: Peça correta [Fernando Portela de Castro (1996)]

As inclusões de grafite também podem ocorrer nas peças vazadas. Este problema é abordado na tabela 2.16.

Tabela 2.16: Causas e Correções para Inclusões de Grafite [Fernando Portela de Castro (1996)]

<b>Tipo de defeito</b>	<b>Causas</b>	<b>Correções</b>
Inclusões de Grafite	<ul style="list-style-type: none"><li>• emprego de um banho de pintura muito antigo</li><li>• depósito de pintura demasiado espesso: banho demasiado concentrado em grafite</li><li>• banho de grafite mal diluído</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• preparar novo banho</li><li>• decapar a coquilha</li><li>• medir densidade do banho de grafite</li><li>• diluir banho com adição de água limpa. Limpar a tina dos aglomerados de grafite em pasta. Agitar frequentemente o banho</li></ul>



Figura 2.6: Peça com excesso de grafite [Fernando Portela de Castro (1996)]

Relativamente aos defeitos gasosos, estes podem surgir como inclusões (geralmente de forma esférica, devido à pressão interna no interior das bolhas) causadas por ar que não conseguiu escapar da moldação. No caso da fundição por baixa pressão este defeito não irá ter grande tendência a aparecer, caso sejam respeitadas as regras de traçado de peças fundidas. A tabela 2.17 apresenta causas e correções possíveis.

Tabela 2.17: Causas e Correções para Defeitos Gasosos [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Poros/Novelos	<ul style="list-style-type: none"> <li>● arrastamento de ar durante o vazamento, por turbulência</li> <li>● respiros insuficientes na coquilha</li> <li>● baixa permeabilidade dos machos</li> <li>● reação metal/moldação ou metal/macho</li> <li>● humidade nas pinturas ou machos</li> <li>● metal líquido com muitos gases dissolvidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● modificar sistema de gitagem por forma a reduzir turbulência</li> <li>● maior dimensão/número dos respiros</li> <li>● controlar qualidade dos machos</li> <li>● controlar humidade de machos e pinturas. Secar colheres de vazamento</li> </ul>



(a)



(b)

Figura 2.7: Peças com poros [Fernando Portela de Castro (1996)]

**Rechupes e Contrações Sólidas** Os rechupes nas peças fundidas surgem na falha de compensação dimensional na transformação líquido-sólido. O seu aparecimento é, regra geral, atribuído a falhas no sistema de alimentação e gitagem da peça, assim como a erros de desenho. A bibliografia consultada classifica os rechupes como *Primary Shrinkage* (Rechupes, externos nas peças) e como *Secondary Shrinkage* (Micro-Rechupes, internos nas peças) [Beeley (2001), Campbell (2003)]. Na figura 2.8 é apresentada uma curva de arrefecimento genérica para um metal que solidifica.

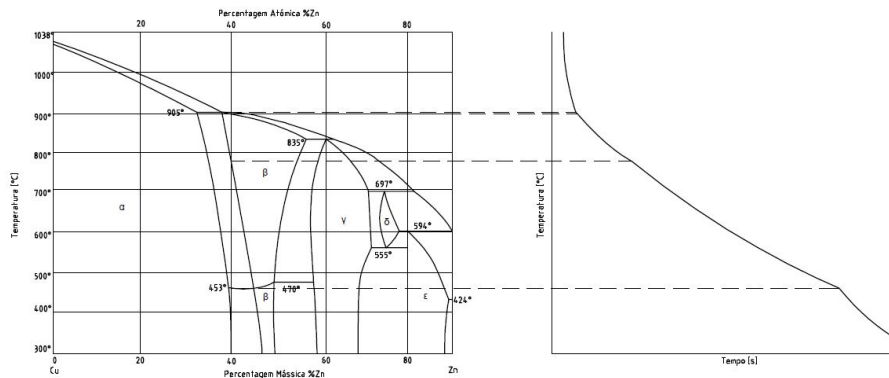


Figura 2.8: Curva de Arrefecimento para um Latão 60-40

Segundo esta curva, podem-se identificar 3 fases no regime de arrefecimento de um metal [Campbell (2003)]:

1. À medida que a temperatura reduz, o metal líquido começa a contrair (como na contração de mercúrio num termómetro); geralmente esta contração não é notada e é praticamente irrelevante no contexto da fundição;
2. Contração na Solidificação, é a reorganização da estrutura cristalina e na ordem dos cristais que levam à contração volumétrica do metal. É nesta fase que os problemas mais significativos (rechupes e micro-rechupes) ocorrem;
3. Contração sólida, expressa no fator de contração dos metais, que pode levar a empenos e deformações plásticas, incluindo a fissuração a frio. Estas contrações são contabilizadas no desenho e projeto das peças.

Os rechupes ocorrem, regra geral, nas últimas zonas a solidificar. Podem ser corrigidos por maquinagem posterior, dado que aparecem à superfície das peças. Na figura 2.9 apresentam-se diferentes tipos de rechupes e micro-rechupes nas zonas em que costumam acontecer.

Os micro-rechupes são diferentes dos rechupes na medida em que se formam no interior das peças (como na figura (b), por exemplo, apresentada na figura 2.9). Chamam-se *secondary shrinkage* pois ocorrem muitas vezes por baixo de rechupes grandes, que são posteriormente maquinados e desaparecem, deixando por vezes a peça estética e dimensionalmente correta mas com

falhas microscópicas internas que podem comprometer o seu funcionamento (no caso das torneiras comprometem a sua estanqueidade sob pressão, levando à origem de fugas) [Beeley (2001)].

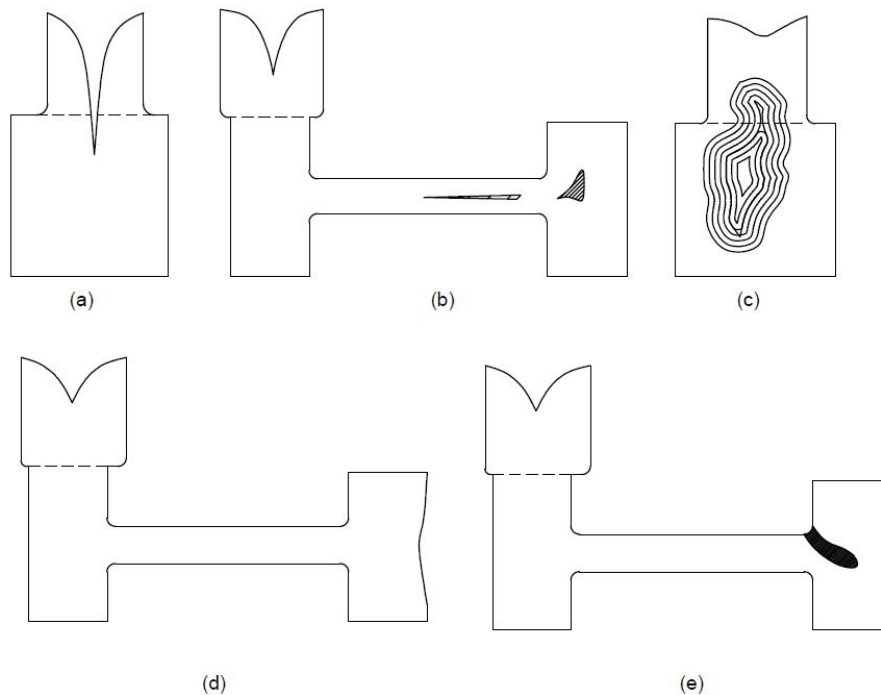


Figura 2.9: Diferentes tipos de Rechupes e Micro-Rechupes. Adaptado de [Beeley (2001)]

O aparecimento de rechupes está diretamente relacionado com as contrações na solidificação das ligas, e com o mecanismo sob o qual esta se processa. Em [Society (1984)] estabelecem dois grupos para definir a forma de solidificação das ligas de cobre.

### Grupo I

Solidificação em "Pele" (*Skin Formation*). Ocorre em ligas com baixo intervalo de solidificação;

### Grupo II

Solidificação em "Pasta" (*Mushy Manner*). Ocorre em ligas com um largo intervalo de solidificação.

Na tabela 2.18 apresenta-se a divisão de algumas ligas de cobre e a sua inserção nos grupos acima referidos .

As ligas do Grupo I dão origem a rechupes superficiais grandes e a buracos geralmente no meio das peças, devido ao arrefecimento direcional em pele que se verifica. Tal defeito é visível na figura 2.9 (a) e (d).

Em ligas do Grupo II, pode-se considerar que a liga se mantém bem fluida até estar 70% sólida. A partir deste ponto começa a contração da liga, no estágio de *mass feeding* (que conta para 2/3 da contração total da liga, ou seja, se uma liga tem 6% de contrações, sabemos que 4% são



devido ao estágio de *mass feeding*). Este estágio é a re-organização dos cristais e a sua tentativa de compactação. É aqui, quando os cristais já se encontram nas suas posições finais e não se mexem mais, que as pequenas dendrites competem entre si pelas pequenas bolsas de líquido que restam, que, sem acesso a metal líquido, dão origem a micro-rechupes na sua contração.

Tabela 2.18: Ligas e formas de solidificação [Society (1984)]

Grupo I - <i>Skin Formation</i>	Grupo II - <i>Mushy Manner</i>
Cobre desoxidado	Bronze de Estanho
Cobre " <i>Tough Pitch</i> "	Bronze com Chumbo
Cobre Crómio	Latão Vermelho
Cobre Telúrio	Latão Semi-Vermelho
Cobre Cádmio	Prata de Níquel
Cobre Berílio	
Bronze de Manganês	
Latão Amarelo	
Bronze de Alumínio	
Bronze de Silício	
Bronze de Manganês e Alumínio	
<i>Cupronickel</i>	

São também propostas em [Society (1984)] fórmulas empíricas para o cálculo dos tempos de solidificação totais de peças, tanto para ligas que se insiram no Grupo I como no Grupo II:

$$G.I : d = q\sqrt{t} \quad (2.7)$$

em que  $d$  corresponde à *shell thickness* (espessura da peça),  $q$  corresponde à constante de solidificação (própria para cada liga) e  $t$  corresponde ao tempo de solidificação.

$$G.II : t = \frac{1}{q^2} \left( \frac{V}{A} \right)^2 \quad (2.8)$$

que corresponde à Regra de Chvorinov; em que  $t$  é o tempo de solidificação,  $\frac{1}{q^2}$  é a constante de solidificação (que vale 13,7 para o caso do cobre) e  $V$  corresponde ao volume da peça e  $A$  corresponde à área de superfície desta.

A tabela 2.19 apresenta causas e possíveis correções para rechupes.

Tabela 2.19: Causas e Correções para Rechupes [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Rechupe	<ul style="list-style-type: none"> <li>● massas isoladas</li> <li>● incorreto traçado da peça, não possibilitando solidificação dirigida (direccional)</li> <li>● contração na solidificação, não compensada por uma alimentação bem dimensionada</li> <li>● temperatura muito elevada</li> <li>● pressão gasosa muito elevada</li> <li>● basculamento mal ritmado em relação à velocidade de vazamento</li> <li>● deficiente regularidade da pintura de grafite</li> <li>● composição química da liga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● melhoria do traçado da peça de forma a eliminar massas isoladas</li> <li>● promover solidificação dirigida (direccional)</li> <li>● modificar sistema de alimentação</li> <li>● vaziar à temperatura mais baixa possível, limitando a contração do metal no estado líquido</li> <li>● baixar temperatura de vazamento. Aumentar número de respiros na coquilha</li> <li>● executar basculamento e vazamento bem ritmados</li> <li>● verificar pintura da coquilha</li> <li>● verificar composição da liga</li> </ul>

Apresenta-se uma imagem de uma peça com rechupes visíveis (e podemos afirmar com toda a certeza que existirão micro-rechupes, no entanto estes não são visíveis a olho nu), na figura 2.10:



Figura 2.10: Peça com Rechupe [Fernando Portela de Castro (1996)]

Segundo [Campbell (2003)], não há uma grande diferença entre macro-rechupes e micro-rechupes, pois gradualmente um muda para o outro à medida que as condições de solidificação se agravam.

Ao solidificar, o líquido é sugado da superfície em contato com o ar, sendo também sugado ar que é puxado para as zonas interdendríticas num processo semelhante à alimentação de metal só que neste caso com gás. Criam-se portanto pequenas porosidades no espaço interdendrítico, que são defeitos indistinguíveis para todos os efeitos dos micro-rechupes, pois numa secção polida apresentam-se apenas como poros interdendríticos, quando na realidade são apenas um poro de estrutura complexa tridimensional que vai até à superfície (ao contrário dos micro-rechupes que são completamente internos). Aparentemente, este defeito é muito comum em ligas com grandes intervalos de solidificação, pois nos espaços interdendríticos torna-se mais fácil ir buscar líquidos às zonas adjacentes em vez de ir ao gito mais próximo.

Finalizando o estágio de solidificação, a liga entra na zona de contração sólida do metal. A coesão interna dos metais é uma das maneiras de contrariar a sua própria contração na solidificação, através das tensões internas desenvolvidas. Ainda assim, são utilizadas medidas adicionais para prevenir possíveis empenos e deslocamentos ou movimentos das peças. A tabela 2.20 apresenta propriedades relevantes relativas a alguns metais utilizados na indústria de fundição.

Tabela 2.20: Coeficientes de Expansão, Temperaturas de Fusão e Contrações Lineares no estado sólido típicas para alguns metais [Beeley (2001)]

Metal	Coeficiente de Expansão Linear ( $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^6$ )	Temperatura de Fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	Contração Linear aproximada até $20^{\circ}\text{C}$ (%)
Alumínio	29,2	660	1,9
Cobre	20,6	1083	2,2
Ferro	17,3	1536	2,6
Chumbo	31,6	327	1,0
Magnésio	31,4	649	2,0
Níquel	18,4	1453	2,6
Estanho	24,4	232	0,5
Zinco	35,9	420	1,4

Também em [Campbell (2003)] é apresentada uma tabela semelhante que mede a variação volumétrica de metais no estado sólido, reproduzida na tabela 2.21.

Tabela 2.21: Contração no estado sólido para alguns metais [Campbell (2003)]

Metal	Estrutura Cristalina	Ponto de Fusão (°C)	Densidade Líquida	Densidade Sólida	$\Delta V$ (%)
...	...	...	...	...	...
Cu	FCC	1083	7938	8382	5.30
Ni	FCC	1453	7790	8210	5.11
Pb	FCC	327	10 665	11 020	3.22
...	...	...	...	...	...
Sn	TETRAG	232	6986	7166	2.51
Bi	RHOMB	271	10 034	9701	-3.32
...	...	...	...	...	...

Da análise da tabela 2.21 surgem algumas questões pertinentes para o estudo atual: no caso do Cobre, a variação de volume foi de 5,3%. Já no Bismuto a reação é contrária, sendo a variação de volume negativa, ou seja, expande-se. Esta expansão é favorável à replicação de detalhes mais finos pois, ao expandir, consegue colar-se aos pequenos detalhes da moldação, mas surge então a questão: irá trazer problemas na geração de defeitos? É sabido, pelo trabalho de [M. Martinez-Hernandez (2013)], que o Bismuto tem tendência a segregar nas fronteiras de grão, será que ao expandir não irá introduzir tensões desnecessárias na estrutura interna da peça? Esta é uma questão que deverá ser estudada com atenção.

Podemos observar na figura 2.11 uma peça genérica com secções de diferentes espessuras e a maneira como estas são afetadas pelas tensões desenvolvidas na solidificação dos metais. É visível a transição entre a compressão e tensão criadas devido à existência das diferentes espessuras.

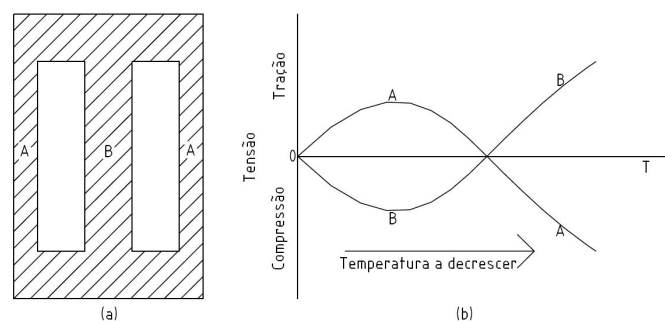


Figura 2.11: Desenvolvimento de forças devido a contrações internas nas peças. Adaptado de [Beeley (2001)]

Segundo [Beeley (2001)], durante este arrefecimento podemos caracterizar 4 estados relativamente às propriedades mecânicas das peças. São eles :

1. Período de solidificação em que ainda há líquido suficiente presente em todas as áreas (inclusive entre dendrites) para compensar a contração do material. A resistência mecânica das peças é mínima, mas a ductilidade é infinita. Pode chamar-se a esta fase *Liquid-Solid Stage*;

2. Período em que a solidificação é quase total mas ainda estão presentes pequenas quantidades de metal líquido que atrasam o desenvolvimento de uma coesão ótima na peça. A contração é como num metal sólido, embora o metal seja fraco e a ductilidade quase inexistente. Pode chamar-se a esta fase *Solid-Liquid* ou *Coherent Brittle Stage*;
3. Região sólida de elevada temperatura em que o metal desenvolve resistência limitada e capacidade para deformação plástica sem endurecimento/*strain hardening*;
4. Região sólida de baixa temperatura associada com elevada resistência mecânica e comportamento elástico.

Estes estágios de arrefecimento são semelhantes, no seu fundamento, aos definidos por [Campbell (2003)].

Se as forças de contração do metal forem críticas, na fase em que o metal está quente e frágil devido à existência de camadas líquidas, ocorre fissuração a quente (*Hot Tearing*). Contudo, mesmo que o metal sobreviva a esta fase, pode ainda ocorrer deformação plástica a baixas temperaturas (e ainda possíveis fraturas - a Fissuração a Frio).

Quanto à fissuração a quente, podemos caracterizar as falhas que aí têm origem observando a sua forma: as fissuras a quente apresentam uma forma irregular, exibindo uma fratura parcial ou completa segundo um caminho intergranular. Estão muitas vezes localizadas em zonas com diferenças nas secções, onde a concentração de tensões ("*stress*") está associada ao atraso no arrefecimento. No entanto, estas podem ocorrer internamente, situação em que se confundem com rechupes e micro-rechupes, tendo causas semelhantes e misturadas, razão pela qual é difícil distingui-las. A fissuração a quente ocorre no estágio 2 definido por [Beeley (2001)], o *Solid-Liquid* ou *Coherent Brittle Stage*. Existem vários fatores que afetam a tendência para uma dada peça apresentar fissuração a quente, entre eles: o tipo de liga, a geometria da peça, o projeto dos sistemas de alimentação e gitagem e as condições de vazamento. [Campbell (2003)] defende que a maneira mais eficaz de evitar a fissuração a quente é melhorando os sistemas de alimentação e gitagem da peça.

A existência de *hot spots* (pontos quentes) ocorre em qualquer interseção ou variação de secção positiva (de uma secção menor para uma maior). A espessura da parede deve ser mantida constante, sempre que possível, para igualar o modo de arrefecimento na moldação, sendo recomendável a utilização de "*chills*" (zonas em ligas altamente condutoras ou com arrefecimento local para promover o arrefecimento localizado de partes da moldação) em casos em que seja impossível alterar a geometria da peça. Estes maciços de material são, conseqüentemente, das últimas zonas a solidificar, e das zonas mais propensas ao aparecimento de defeitos [Beeley (2001), Campbell (2003), Fernando Portela de Castro (1996), Society (1984)].

Relativamente aos sistemas de alimentação e gitagem, é sabido que os ataques à peça nas zonas dos gitos são das zonas com maior tendência à formação de fissuras devido à sua massividade e à concentração de calor e de material [Beeley (2001)]. É necessário prestar especial atenção à solidificação direcional das peças, para dirigir o calor para estas áreas que serão posteriormente cortadas e, portanto, irrelevantes para a qualidade final da peça.

Podem também ser analisadas as condições de vazamento da liga, pois contêm vários parâmetros relevantes para o controlo das peças finais. A temperatura de vazamento, por exemplo, é de uma importância vital na propensão de uma certa peça ao desenvolvimento de defeitos: uma temperatura de vazamento demasiado elevada está associada a um aumento no aparecimento de fissuras, prevenindo por outro lado o aparecimento de rechupes e micro-rechupes; no entanto, condições limite baixas também poderão dar origem a estes defeitos (para além de *cold runs* e *cold shuts*). A solução ideal é, portanto, encontrar uma temperatura que garanta o compromisso perfeito entre vazabilidade e intervalo de solidificação para prevenir o aparecimento de defeitos.

Quanto à fissuração a frio, esta caracteriza-se pela grande extensão e linearidade das suas rachadelas, em oposição à irregularidade apresentada da fissuração a quente. Ocorre no período em que a peça já arrefeceu abaixo das temperaturas de fissuração a quente mas ainda está acima da temperatura do domínio elástico (estado 3 definido por [Beeley (2001)] referido acima), e a resistência causada pelas pressões internas do material é acomodada por deformação plástica contínua. No entanto, com velocidades de arrefecimento extremamente rápidas ocorre a fratura. A expressão

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

permite-nos relacionar as tensões desenvolvidas ( $\sigma$ ) com o módulo de Young do material ( $E$ ), o coeficiente de expansão térmica deste ( $\alpha$ ) e a diferença de temperaturas entre dois membros diferentes ( $\Delta T$ ) [Beeley (2001)].

Apresenta-se seguidamente uma tabela, tabela 2.22, com causas e possíveis correções, sugerida por [Fernando Portela de Castro (1996)].

Tabela 2.22: Causas e Correções para Fissuras [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Rachadelas	<ul style="list-style-type: none"> <li>● choque térmico</li> <li>● temperatura de vazamento demasiado alta</li> <li>● teor em zinco muito elevado = dureza</li> <li>● teor de estanho muito elevado</li> <li>● grão grosseiro</li> <li>● temperatura da coquilha não homogénea</li> <li>● contração da peça dificultada</li> <li>● desmoldagem da peça demasiado rápida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● aumentar espessura da pintura de grafite</li> <li>● baixar a temperatura de vazamento</li> <li>● controlar e eventualmente corrigir a composição química: o teor em estanho não deve exceder 0,6%</li> <li>● adicionar afinadores de grão</li> <li>● verificar a temperatura da coquilha</li> <li>● aumentar colapsibilidade dos machos</li> <li>● desmoldar mais tardiamente a peça após vazamento</li> </ul>

Uma fissura é apresentada na figura 2.12.

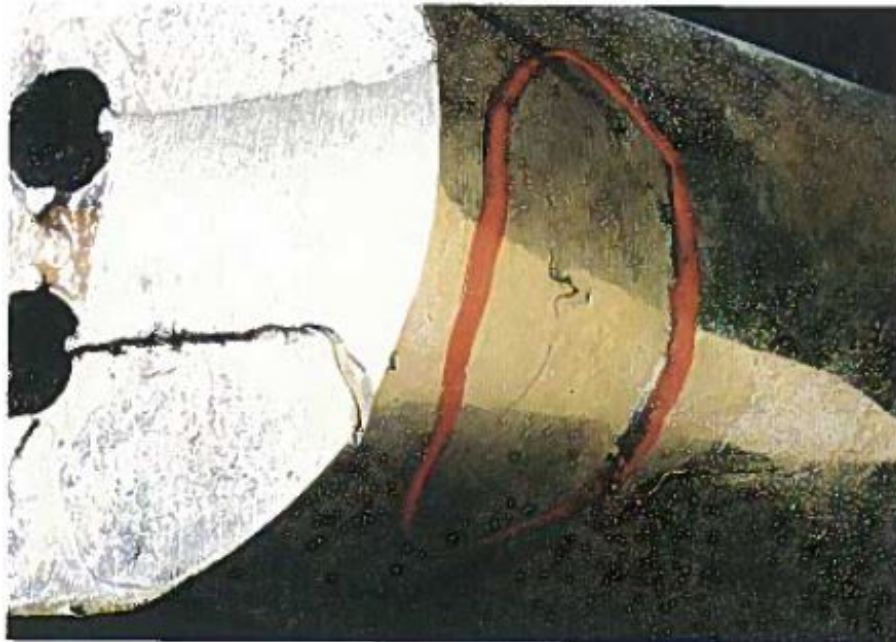


Figura 2.12: Peça com fissura [Fernando Portela de Castro (1996)]

A partir do Atlas de Defeitos de Fundição em Coquilha por Gravidade, apresentado em [Fernando Portela de Castro (1996)], referem-se mais defeitos possíveis:

- Machos partidos ou deslocados
- Rugosidade Superficial
- Enchimento Incompleto
- Rebarbas
- Caudas de Cometa
- Refervido

Apresentam-se seguidamente tabelas de Causas/Correções e respetivas figuras representativas de cada um dos defeitos acima mencionados.

Tabela 2.23: Causas e Correções para Machos partidos ou deslocados [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Macho partido ou deslocado	<ul style="list-style-type: none"> <li>● colocação deficiente do macho</li> <li>● incorreto dimensionamento do macho</li> <li>● movimentação do macho após fecho da coquilha</li> <li>● areia mal preparada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● colocar corretamente o macho</li> <li>● dimensionamento correto do macho</li> <li>● verificar dimensões do macho e da cavidade</li> <li>● verificar composição da areia</li> </ul>



(a)



(b)

Figura 2.13: Peças com macho partido (a) e deslocado (b) [Fernando Portela de Castro (1996)]



Tabela 2.24: Causas e Correções para Rugosidades [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Rugosidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sistema de gitagem deficientemente projetado</li> <li>● reação metal/moldação, promovida por temperatura elevada</li> <li>● desagregação da areia dos machos, provavelmente por deficiente cozedura daqueles</li>   <li>● enchimento turbulento</li> <li>● deficiente pintura do macho</li> <li>● deficiente pintura na coquilha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● rever localização, forma, secção e número de ataques à peça</li> <li>● diminuir temperatura de vazamento</li> <li>● colocação cuidada do macho e fecho cuidadoso da coquilha, por forma a evitar a desagregação da areia. Empregar machos com boa qualidade superficial, verificar mistura de areia e controlar a temperatura de cozedura</li> <li>● encher calmamente, com o mínimo de turbulência possível</li> <li>● pintar machos nas zonas afetadas</li> <li>● pintar a coquilha com mais espessura</li> </ul>



Figura 2.14: Peça com Rugosidade provocada por gitagem incorreta [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tabela 2.25: Causas e Correções para Enchimento Incompleto [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Enchimento Incompleto	<ul style="list-style-type: none"> <li>● temperatura de vazamento baixa</li> <li>● sistema de gitagem mal concebido ou mal dimensionado</li> <li>● respiros insuficientes ou obstruídos</li> <li>● ataques demasiado finos</li> <li>● coquilha demasiado fria</li> <li>● pintura da coquilha pouco espessa</li> <li>● deficiente composição química da liga</li> <li>● vazamento muito lento</li> <li>● peça de espessura muito fina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● elevar a temperatura de vazamento</li> <li>● corrigir ou re-dimensionar o sistema de gitagem</li> <li>● aumentar quantidade de respiros e de ataques e/ou respetiva secção</li> <li>● não deixar arrefecer tanto a coquilha</li> <li>● aumentar espessura da pintura de grafite</li> <li>● usar lingote de composição apropriada</li> <li>● aumentar velocidade de vazamento</li> <li>● rever traçado da peça. Se possível, aumentar à espessura das peças nas zonas de enchimento mais difícil</li> </ul>



Figura 2.15: Peça com enchimento incompleto [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tabela 2.26: Causas e Correções para Rebarbas [Fernando Portela de Castro (1996)]

<b>Tipo de defeito</b>	<b>Causas</b>	<b>Correções</b>
Rebarbas	<ul style="list-style-type: none"><li>• folgas entre as duas partes da coquilha ou entre a coquilha e macho</li><li>• empeno da coquilha</li><li>• deformação da superfície de apartação</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• controlar dimensionalmente os machos. Ajustar coquilha e macho</li><li>• aumentar a espessura das paredes da coquilha, por forma a minorar os empenos</li></ul>



Figura 2.16: Peça com Rebarbas devido a empeno da coquilha [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tabela 2.27: Causas e Correções para Caudas de cometa [[Fernando Portela de Castro \(1996\)](#)]

<b>Tipo de defeito</b>	<b>Causas</b>	<b>Correções</b>
Caudas de Cometa	<ul style="list-style-type: none"><li>• presença de ferro oxidado, mesmo em pequenas proporções</li><li>• existência de pontos duros durante o polimento</li><li>• composição química da liga não apropriada</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• usar lingotes com teores baixos em ferro e em silício</li><li>• melhorar desoxidação do metal, por adições de alumínio, por exemplo</li></ul>

A presença de ferro oxidado escapa, por vezes, ao controlo efetuado por análise química. [[Fernando Portela de Castro \(1996\)](#)] sugere aplicar, sobre a superfície polida do latão, um papel de filtro que foi embebido numa solução com 1% de ferricianeto de potássio e 1% de ácido clorídrico, em água. Após um período que varia entre 5 a 15 minutos, de contato com a face da peça, o papel apresentará uma cor azulada, permitindo desta forma detetar quaisquer inclusões de ferro oxidado.

Figura 2.17: Peça com caudas de cometa [[Fernando Portela de Castro \(1996\)](#)]

Tabela 2.28: Causas e Correções para Refervido [Fernando Portela de Castro (1996)]

Tipo de defeito	Causas	Correções
Refervido	<ul style="list-style-type: none"> <li>● temperatura de vazamento demasiado elevada</li> <li>● machos húmidos (pintura fresca)</li> <li>● coquilha húmida</li> <li>● elevada humidade ambiente</li> <li>● basculamento e vazamento não ritmados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● baixar a temperatura de vazamento, dentro dos limites tecnicamente possíveis</li> <li>● deixar secar bem a pintura dos machos. Evitar colocar os machos em ambientes húmidos</li> <li>● eliminar humidade da coquilha</li> <li>● basculamento e vazamento ritmados</li> </ul>



Figura 2.18: Peça com refervido [Fernando Portela de Castro (1996)]

### 2.3.4 Análise aos defeitos das peças da CIFIAL

Foi elaborado um relatório que compreende uma análise aos defeitos presentes nas peças que a *CIFIAL* forneceu ao INEGI, antes do início desta dissertação. Foram analisadas micrografias das zonas problemáticas das peças e elaboradas soluções com respetivas propostas de melhoria. Tal documento apresenta-se em formato completo no anexo [A](#).

## 2.4 Simulação Numérica

A simulação numérica é, atualmente, uma componente fulcral no desenvolvimento de qualquer produto de fundição. Através da simulação numérica conseguem-se obter soluções para sistemas de equações complexos, soluções estas que seriam quase impossíveis de obter através de uma resolução analítica do sistema.

A ideia de discretizar problemas, dividindo-os em sub-problemas, remonta à antiguidade: já os filósofos gregos propuseram a existência de partículas indivisíveis e fundamentais (os átomos), previndo que o estudo destas partículas fundamentais seria do maior interesse quando na análise do mundo que nos rodeia. Extrapolando este conceito, surgiu a ideia de analisar os problemas de análise de tensões e forças em materiais, dividindo ao máximo os elementos em análise, aproximando a sua geometria unificada a uma composta por  $n$  pequenos elementos individuais: os elementos finitos. Estes elementos unitários estão ligados entre si por nós, criando uma malha de elementos finitos. Este processo de discretização da geometria da peça tem o nome de processo de geração de malha. [de Magalhães (2014)]

A abordagem moderna a estes problemas teve início em cerca de 1943, quando Courant propôs a utilização de um modelo discretizador baseado em pequenos elementos individuais. No entanto, o termo "Elementos Finitos" só foi utilizado em 1960 por Clough. [Chen (2011), Tirupathi R. Chandrupatla (2012)] Na altura era inconcebível projetar problemas para o poder de processamento que temos atualmente: de acordo com a Lei de Moore, o número de transístores num processador (diretamente relacionados com a capacidade de processamento deste) duplica a cada dois anos. Tendo em conta que a lei de Moore foi definida por volta de 1970, quando o número de transístores num processador era de mais ou menos 2000 2300, e que agora o número de transístores num processador de última geração ronda os 2,6 biliões (2 600 000 000), podemos apenas imaginar o quanto este método continuará a evoluir a par com a evolução eletrónica. Os *softwares* utilizados evoluem constantemente e a possibilidade de analisar problemas cada vez mais complexos é uma realidade que torna o estudo destes processos de análise numa componente essencial no *portfolio* de um engenheiro. [Wikipedia (c)]

O uso de *software* adequado permite analisar estruturas, vigas e componentes individuais sob este ponto de vista: é criada a peça em CAD3D, analisada pelo *software* (definindo-se o material desta, geometrias, efetuando quaisquer simplificações que sejam necessárias), gerada a malha de elementos finitos, definidas as condições de fronteira do problema, calculadas as cargas a que a peça está sujeita e calculadas as soluções para as equações diferenciais que definem o comportamento mecânico da peça. Este resultado final é, regra geral, apresentado de uma forma que permita a fácil leitura e interpretação dos resultados da simulação, geralmente através da sobreposição da peça na sua geometria original com cores que ilustram zonas sob diferentes condições.

A precisão da solução e a sua fiabilidade são determinadas pelo número de elementos utilizados: numa situação real, podemos considerar que o número de "elementos finitos" de uma peça é infinito (é-nos possível discretizar uma peça praticamente até à infinidade, desde moléculas, átomos, até aos componentes atómicos, e mais ainda!); logo, a aproximação teórica deverá usar um

número de elementos finitos o mais elevado possível, tendo em conta que quanto maior o número, maior o poder de processamento necessário pelo computador que está a efetuar o cálculo e maior o tempo consumido, e, conseqüentemente, maior o custo da análise. É necessário ter sempre em conta este *trade-off*: fiabilidade do cálculo *versus* custo da simulação.

### 2.4.1 O uso da modelação numérica nos Processos de Fundição

Como é previsível, a possibilidade de efetuar simulações no contexto da fundição é uma mais-valia poderosíssima no panorama atual da indústria. Simular o vazamento e a solidificação das peças que se pretendem produzir é uma tarefa árdua e fastidiosa, mas com benefícios a curto e a longo prazo: a poupança monetária e horária é o primeiro fator que salta à vista, pois ao simular o vazamento evita-se a necessidade de ir fazendo *test runs* e pré-séries de ajuste de parâmetros; evitam-se também possíveis defeitos de fundição que possam ser causados pela geometria da peça e da moldação, por exemplo; afinam-se os parâmetros necessários para o vazamento de uma boa peça, tendo em conta temperaturas de vazamento, temperaturas da coquilha ou da moldação, velocidades de enchimento, . . . ; todos os parâmetros que é possível controlar numa situação real, são passíveis de ser controlados através de uma simulação adequada.

Em [Monteiro (1996)], é estudado o comportamento térmico de moldações metálicas numa situação de vazamento, recorrendo ao Método das Diferenças Finitas (MDF). Este extenso estudo, em que o código de análise de elementos finitos é desenvolvido pelo autor, validou o modelo proposto de estudo do comportamento térmico das coquilhas, e partindo de um modelo de análise puramente teórico, evidencia os fatores que maior influência têm na velocidade de solidificação: moldação (temperatura e material), metal vazado e respetivas condições de contacto entre o metal e a moldação. No entanto, depois de um estudo atento sobre o documento, conclui-se que devido à análise simplista do modelo analítico, fica por conhecer o que se passa quando:

1. O metal não é vazado à temperatura de fusão,  $\theta_f$  (de acordo com a simbologia proposta no documento), mas a uma temperatura superior;
2. A moldação tem paredes de dimensões finitas;
3. A peça tem paredes de dimensões finitas, geralmente pequenas;
4. A parede exterior da moldação troca calor com o ambiente;
5. A resistência térmica da interface metal-moldação varia com o decorrer do processo de arrefecimento, porque as condições de contração são distintas para a moldação e para a peça;
6. O campo inicial de temperaturas da moldação não é uniforme;
7. A mudança de fase sólido-líquido não ocorre a temperatura constante, mas sim num intervalo de temperaturas;
8. A geometria da interface de contacto entre metal e moldação não é plana.

Analisando os pontos levantados, conclui-se que o documento estudado é pouco relevante para o âmbito deste trabalho, devido às lacunas que apresenta e que estão diretamente relacionadas com o presente estudo, não deixando no entanto de ser uma leitura extremamente interessante no contexto da simulação numérica de processos de fundição e no estudo do método das diferenças finitas.

Atualmente são utilizados diversos *softwares* de elevada qualidade na indústria de produção e desenvolvimento de peças, especialmente na indústria de fundição. A possibilidade de simular vazamentos revolucionou esta indústria, e apresenta ainda perspectivas futuras que são extremamente aliciantes. O principal inconveniente desta solução é o fator económico: a aquisição e manutenção do *software* representa um grande investimento que por vezes é inviável, principalmente no panorama económico atual. Ainda assim, nota-se vontade por parte das empresas em adquirir tal *software*.

## 2.4.2 Método de Elementos Finitos e Método das Diferenças Finitas

Dentro da temática dos elementos finitos, podemos dividir a análise de problemas em duas abordagens semelhantes: o Método de Elementos Finitos e o Método das Diferenças Finitas, doravante designados por MEF e MDF, respetivamente.

O MDF baseia-se na aproximação do resultado de equações diferenciais através da resolução de equações e algoritmos das diferenças finitas, fazendo sucessivas aproximações às derivadas destas. É um método altamente teórico e que apresenta desvantagens quando comparado com o MEF, que irão ser referidas posteriormente. É um método mais adequado para a resolução de problemas onde não é tão necessário obter soluções tão específicas, mas sim obter soluções para geometrias extremamente grandes, como por exemplo na resolução de problemas de CFD (*Computational Fluid Dynamics* - problemas relativos à mecânica dos fluidos). [Wikipedia (a), Wikipedia (b)]

O MEF, baseando-se no MDF, minimiza a variação do erro das equações diferenciais que definem o problema utilizando métodos variacionais. É o método mais utilizado em engenharia, pois permite uma análise mais detalhada (e, conseqüentemente, menos simplista) aos problemas e geometrias complexas. [Wikipedia (b)]

Podemos estabelecer algumas vantagens do MEF sobre o MDF: [Wikipedia (b)]

- A facilidade em analisar geometrias complexas com o MEF, enquanto que o MDF está geralmente limitado a geometrias simples (retangulares ou pequenas variações destas);
- O MEF é mais fácil de implementar que o MDF;
- Em certos casos é possível considerar o MDF como uma análise especial do MEF, por exemplo, ao analisar geometrias retangulares;
- O resultado final do MEF pode ser considerado mais fiável que o do MDF, pois aprofunda mais a resolução das equações nos elementos;



### 2.4.3 Programas e Códigos

Há uma panóplia de programas e códigos que são utilizados atualmente, desde programas genéricos que permitem ao utilizador uma utilização simples e que aborda de maneira generalista problemas genéricos (cargas simples em vigas, simulação de esforços, etc ...) até programas altamente específicos dedicados à resolução e simulação de certo tipo de problemas e situações (conformação plástica, fundição, etc ...).

#### 2.4.3.1 Genéricos

Dentro dos programas de simulação generalistas, a que chamaremos genéricos, podemos enumerar (a quantidade de programas existentes torna impossível uma análise caso a caso):

- ABAQUS FEA  
*Software* de análise por MEF, extensamente utilizado em engenharia e que suporta vários tipos de materiais e cargas, assim como simulação de diferentes situações;
- MARC  
*Software* semelhante ao ABAQUS que utiliza o MEF para a resolução dos problemas apresentados;
- LS-DYNA  
*Software* muito utilizado na simulação de *crash tests* e na simulação de explosões;
- ANSYS  
*Software* extremamente utilizado na simulação dentro da indústria automóvel, principalmente na otimização de geometrias para melhoria dos fluxos de ar.

#### 2.4.3.2 Específicos

Quanto a programas mais específicos para certas temáticas dentro da engenharia, podemos considerar alguns:

- AutoForm  
*Software* muito utilizado na simulação de conformação plástica de metais, extensamente utilizado na indústria automóvel, por exemplo;
- DEFORM  
Programa utilizado para simular conformação plástica de metais, maquinagem e junção destes;
- MoldFlow  
*Software* da Autodesk utilizado para simular injeção, enchimento e solidificação de plásticos;

- ProCAST

*Software* utilizado no INEGI para efetuar a simulação de vazamento, enchimento e solidificação de peças fundidas. É este o *software* utilizado no desenvolvimento do presente trabalho.

## 2.5 Resumo

A recolha bibliográfica apresentada na presente secção foi considerada suficiente para o trabalho proposto, tendo em conta que um trabalho de revisão bibliográfica nunca estará completo sob nenhum ponto de vista. A investigação incidiu maioritariamente nos temas que irão ser relevantes e abordados na parte prática, pois se fosse necessário ter em conta todas as vertentes dos temas estudados seria impossível compilar toda a informação relevante num número confortável de páginas e de modo sucinto.

Foi estudado o processo de Fundição por Baixa Pressão, secção 2.2, as ligas de cobre, secção 2.3, maioritariamente os latões, pois são os mais utilizados na produção de torneiras e relevantes para o problema em estudo, e foi efetuada uma pequena introdução à simulação numérica, secção 2.4, sem aprofundar demasiado o tema, pois não é esse o foco do trabalho e não é um assunto tão relevante para a execução da parte prática.

Concluiu-se que a atualidade do tema é relativa, pois apesar de este método já ser utilizado à muitos anos e de já haver trabalhos nesta área, o problema apresentado é bem real e atual, e a proposta de soluções para ele é um assunto revestido de importância, tanto para as empresas envolvidas como para o autor.

## Capítulo 3

# Parte Experimental

### 3.1 Introdução

No presente capítulo é abordado o problema prático a tratar, assim como a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho realizado. São apresentados todos os cálculos realizados e as respetivas fontes bibliográficas, quando necessárias.

### 3.2 Identificação do problema a tratar

O problema abordado no trabalho foi apresentado pela *CIFIAL* ao *INEGI*, sendo que este consistia na identificação e proposta de correção de defeitos encontrados em peças vazadas, concretamente torneiras em ligas de cobre vazadas por baixa pressão. Após um estudo atento e análise às peças fornecidas, concluiu-se que os defeitos apresentados são consistentes com rechupes, micro-rechupes e fissurações a quente (*hot tearing*). O estudo generalista destes defeitos, tanto na sua aparência, causas e modos de formação, foi tratado na secção 2.3.3, no capítulo anterior.

Apresenta-se na figura 3.1 uma imagem CAD da torneira estudada, na sua fase inicial (sem alimentadores e sistema de gitagem atualizado).

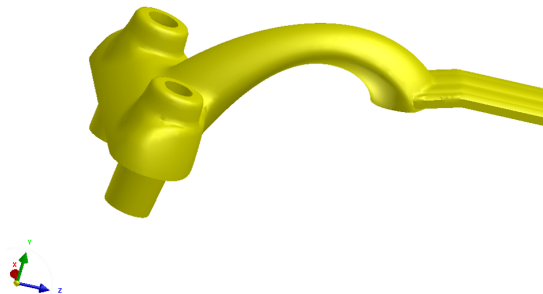


Figura 3.1: Imagem CAD da torneira estudada

As torneiras fornecidas foram cortadas de maneira a expôr a área defeituosa (como representado na imagem 3.2), que foi depois polida e fotografada através do microscópio para providenciar uma visão concreta da microestrutura e dos defeitos.



Figura 3.2: Sentido de Corte das Torneiras. Torneira fornecida pela *CIFIAL* e analisada no *INEGI*

As torneiras fornecidas apresentavam defeitos consistentemente, sendo estes rechupes, micro-rechupes e fissuração a quente, como já foi referido. Todos estes defeitos são tratados no capítulo 2, bem como os seus mecanismos de formação, causas e possíveis correções.

Apresenta-se uma imagem, 3.3, em que são visíveis os micro-rechupes existentes na peça. Estes micro-rechupes dão origem a fugas nos testes de pressurização, o que é inadmissível numa torneira. As micrografias obtidas no *INEGI*, 36 no total, apresentam-se no anexo A.

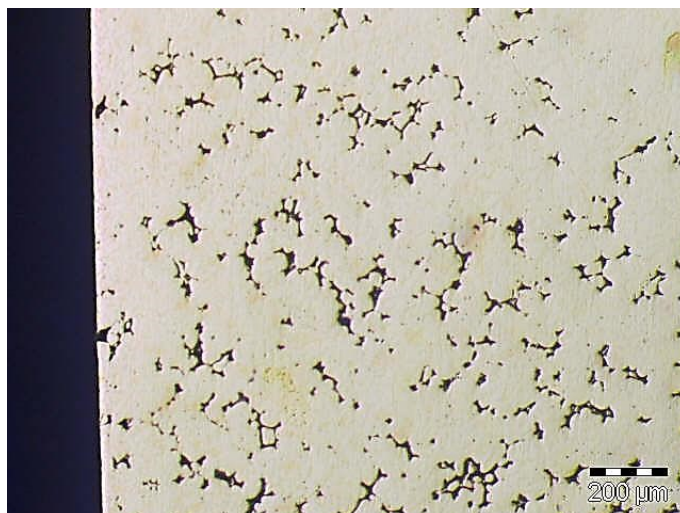


Figura 3.3: Micrografia de Micro-Rechupe presente numa torneira. Imagem tirada no *INEGI* a uma torneira fornecida pela *CIFIAL*

Graças às simulações já realizadas no *INEGI*, apresentadas no anexo A, decidiu-se que o problema iria ser abordado através da introdução de alimentadores na zona afetada pelos defeitos. Os alimentadores têm a função de fornecer metal líquido suficiente às zonas críticas, para que na solidificação destas haja metal líquido suficiente para compensar a variação volumétrica que ocorre na solidificação do metal.

Já foi referido que a liga utilizada possui um intervalo de solidificação grande (130°C), pelo que se insere num grupo intermédio entre o Grupo I e o Grupo II referidos na tabela 2.18. Como tal, o cálculo de alimentadores para esta liga específica vai seguir regras de ambos os grupos.

Um alimentador dimensionado para ligas do Grupo I muitas vezes não produz o efeito desejado, pois como a solidificação da liga se processa de uma maneira mais pastosa, havendo crescimento de grãos com pequenas porções de líquido entre estes, é difícil controlar a solidificação direcional e levar as contrações para a zona do alimentador. É sabido que os alimentadores nestes casos devem, idealmente, ser colocados na parte superior da peça (desde que não interfiram com a geometria desta)[Society (1984)], e que não precisam de pescoço no seu "ataque" à peça [Brown (1999)]. Os alimentadores a usar neste caso terão como função apenas garantir que solidificam depois das zonas críticas da peça.

A designação utilizada na literatura para este tipo de alimentadores é a de "*Dead Risers*"[Society (1984)], sendo, como já foi referido, alimentadores adjacentes às últimas zonas a solidificar, permitindo a utilização de técnicas de dimensionamento de alimentadores utilizadas em ligas do Grupo I, e cujo critério de dimensionamento é o de conseguir que estes alimentadores sejam a última zona da peça a solidificar. Assim sendo, é frequente revestir estes alimentadores com isoladores térmicos e de radiação. No nosso caso tal isolamento é impossível, pois é impossível garantir a boa fixação dos isoladores e o seu posicionamento na coquilha quando esta é submersa no banho de grafite, pelo que se optou por inserir um macho exterior de areia que provoca um arrefecimento muito lento do alimentador, transformando-o num *hot spot* massivo, tornando-o numa das últimas zonas a solidificar [Society (1984), Brown (1999)].

Regra geral, estes alimentadores devem apresentar uma forma cilíndrica e ter diâmetros pequenos e alturas consideráveis: o diâmetro não deverá ultrapassar 1,5 vezes a espessura da secção à qual está ligado, e a altura deverá ser no mínimo 3 vezes o diâmetro [Society (1984)].

É também apresentada a definição de módulo de uma peça, em que, segundo a regra de Chvorinov [Society (1984)]:

$$M_c = \frac{Volume}{CoolingSurface} \quad (3.1)$$

Este termo surge por conveniência, para efetuar substituições nas equações da regra de Chvorinov (equação 2.8), em que o módulo é apenas uma maneira mais curta de dizer "Volume dividido pela área de superfície"[Society (1984), Campbell (2003)]. Note-se que, no contexto do cálculo de alimentadores, o denominador da expressão refere-se apenas à área que contribui para o arrefecimento da peça. Usam-se estas expressões não para saber o tempo total de solidificação, mas para relativizar os tempos de solidificação do alimentador relativamente à peça, pois o que realmente

interessa para este dimensionamento é garantir que o alimentador arrefece depois da peça. Tal é conseguido definindo que:

$$M_r = F \times M_c \quad (3.2)$$

em que  $M_r$  é o módulo do alimentador ("riser" em inglês),  $F$  é um fator referente a cada liga e  $M_c$  é o módulo da peça vazada ("cast" em inglês). Os valores de  $F$  para as ligas de cobre variam entre 1,3 [Society (1984)] e 1,2 [Brown (1999)].

### 3.3 Metodologia Utilizada

O cálculo dos alimentadores revelou-se um problema de certa dificuldade: foi impossível calcular com rigor o volume da peça total e da sua área de superfície, assim como foi impossível calcular o módulo das zonas afetadas: a sua geometria complexa, tanto interior como exterior, e a ausência de um ficheiro CAD que facilitasse a sua introdução em *software* de tratamento da peça (como *SolidWorks*, por exemplo) tornaram esta tarefa impossível. Não obstante o esforço dispendido na tentativa do cálculo do módulo da peça, foi possível calcular o módulo do alimentador dimensionado no *INEGI*, sendo que este era de 4 mm.

$$M_r = \frac{\text{Volume}}{\text{CoolingSurface}} \quad (3.3)$$

$$M_r = \frac{6430,74\text{mm}^3}{1609,1\text{mm}^2} \quad (3.4)$$

$$M_r = 3,996\text{mm} \quad (3.5)$$

$$M_r = 4\text{mm} \quad (3.6)$$

Conjugando as equações 3.2 e 3.6, considerando um fator  $F = 1,3$ :

$$M_r = 1,3 \times M_c \quad (3.7)$$

$$M_c = 3,08\text{mm} \quad (3.8)$$

Chegando, por um processo inverso ao suposto, a um valor de módulo da peça, neste caso da zona afetada, de aproximadamente 3 mm. Este valor será depois confirmado, se possível.

Não foi fornecido o ficheiro CAD da peça em estudo; apenas foram fornecidos os ficheiros relativos à coquilha (Placa Superior e Placa Inferior), assim como o ficheiro do macho interior de areia. São apresentadas imagens das peças CAD fornecidas em 3.4, 3.5 e 3.6, da Placa Superior, Inferior e do Macho Interior, respetivamente.

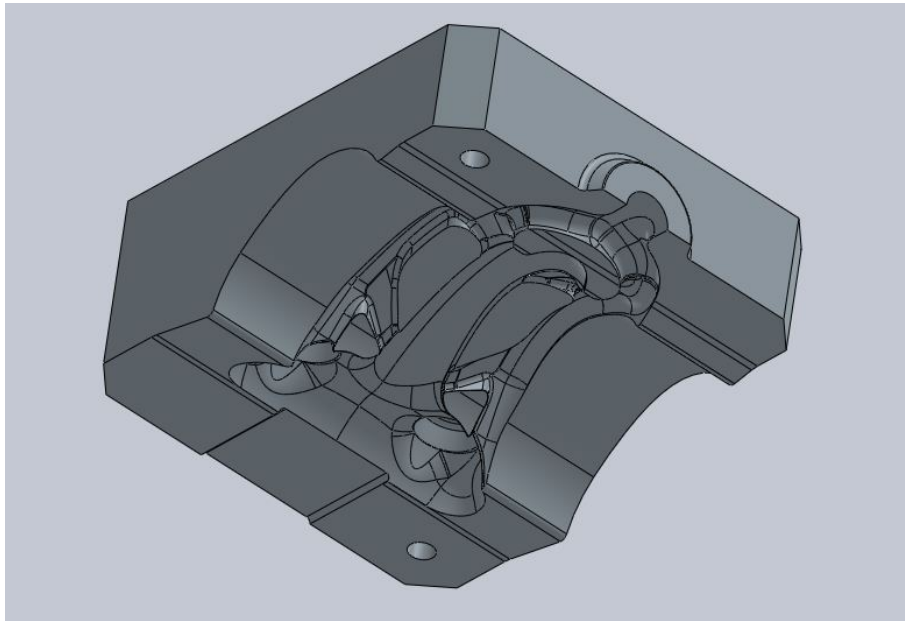


Figura 3.4: Placa Direita da Coquilha

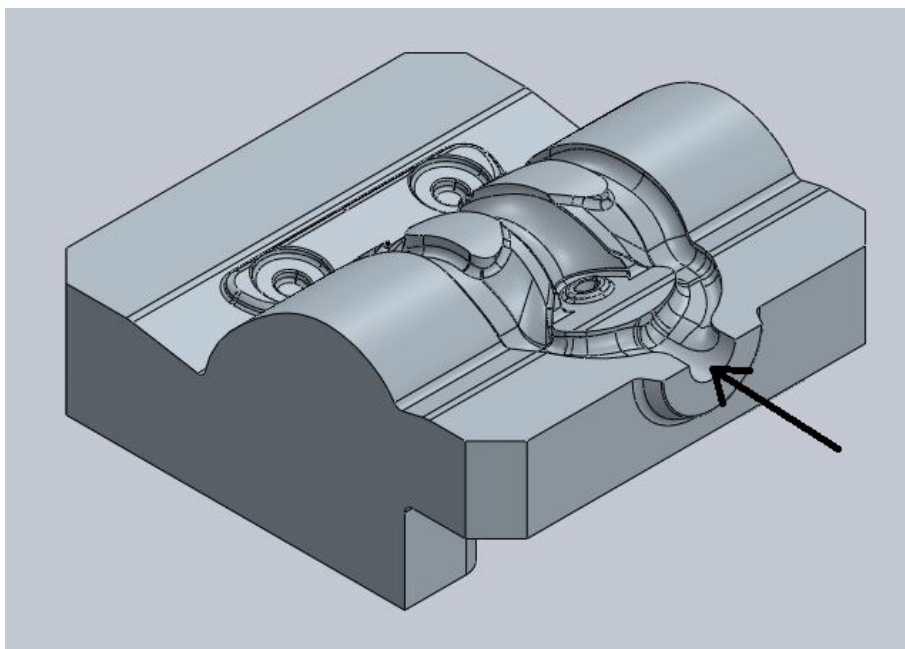


Figura 3.5: Placa Esquerda da Coquilha. Enchimento realizado no sentido da seta representada na figura

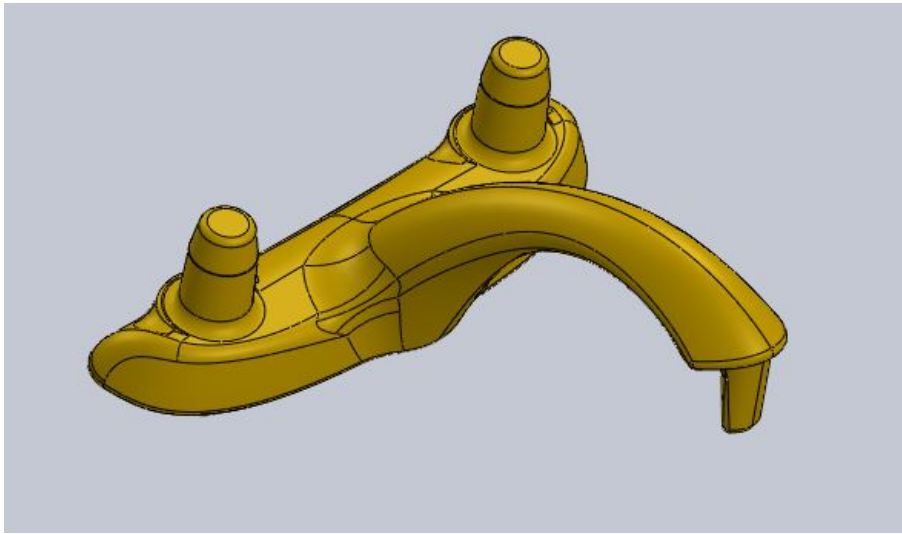


Figura 3.6: Macho Interior

Dimensionou-se um novo alimentador de raiz, mantendo como módulo o valor de  $4\text{ mm}$ , e criando um macho de areia que se ajustasse completamente à geometria da torneira, o que acontece na realidade e não estava a acontecer na simulação realizada no *INEGI*. Todas peças criadas foram realizadas recorrendo ao *software* de modelação 3D *SolidWorks*.

Para tal dimensionou-se um alimentador com as características apresentadas na figura 3.7 e na tabela 3.1. O ângulo de *draft* utilizado foi de  $2^\circ$ , valor utilizado na indústria e calculado a partir dos alimentadores já existentes.

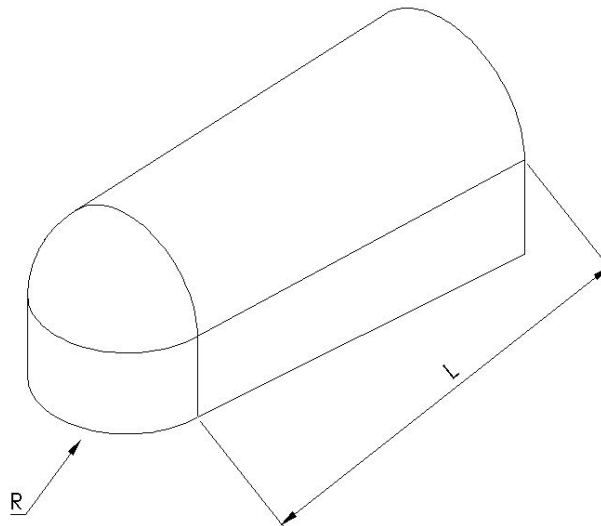


Figura 3.7: Esquema do Alimentador Dimensionado



Tabela 3.1: Valores Utilizados no Dimensionamento do Alimentador

Variável	Valor
R	10 mm
L	25 mm

A partir deste alimentador dimensionou-se o respetivo macho de areia. Dado que a literatura é praticamente inexistente no que toca a este assunto específico (utilização de machos em areia exteriores que funcionem como isoladores), tomou-se como exemplo o macho dimensionado anteriormente no *INEGI*. Como tal, a espessura considerada para o macho foi de 9 mm, na zona curva do alimentador; a espessura será ligeiramente menor na zona mais distante da curva, devido ao aumento do alimentador causado pelo ângulo de *draft*, sendo que a espessura na parte final do alimentador será de cerca de 7,5 mm.

Modelaram-se dois machos de areia: o primeiro (figura 3.8) com a cavidade provocada pelo alimentador, que é o macho que será utilizado na simulação e que corresponde à realidade; o segundo (figura 3.9) é maciço, criado apenas para facilitar a modelação 3D da coquilha quando for necessário efetuar as cavidades nesta.

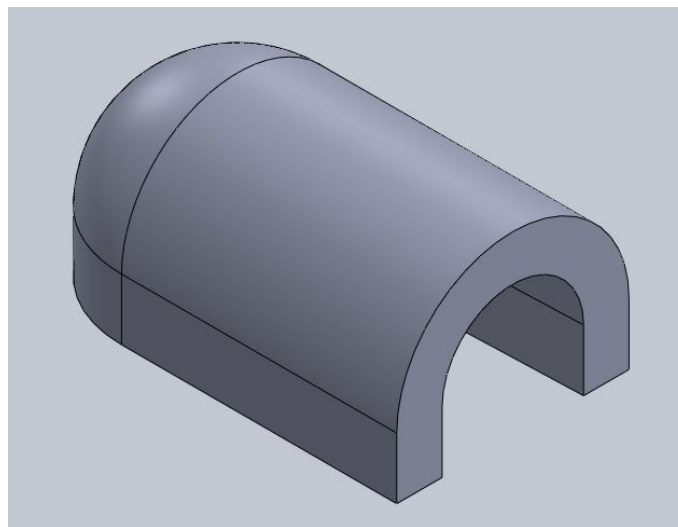


Figura 3.8: CAD do Macho com Cavidade

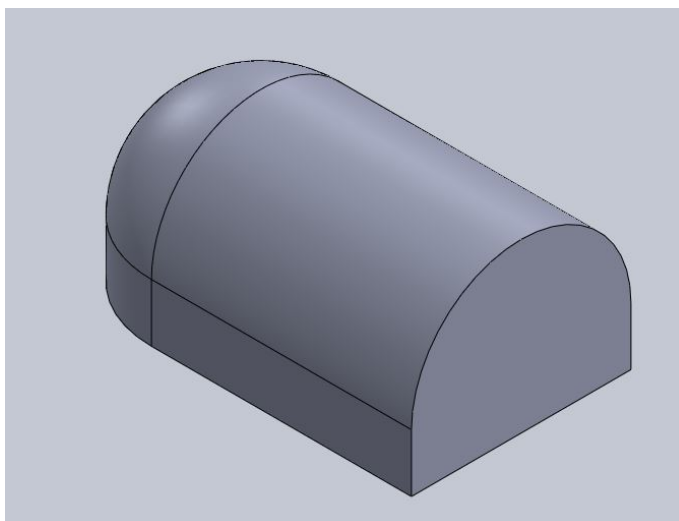


Figura 3.9: CAD do Macho sem Cavidade

Tendo as geometrias do alimentador e do respetivo macho de areia definidas, procedeu-se à obtenção de uma geometria interna da face que estará em contacto com o alimentador e macho para poder dimensionar o macho exatamente adjacente à peça fundida, de modo a que não haja diferenciais de temperatura grandes entre a peça e o macho, e tentando desta maneira garantir uma boa solidificação direcional.

Para tal, modelou-se um bloco maior do que a cavidade que queremos imitar (figura 3.10), e através de um comando de remoção de material do *SolidWorks* foi possível obter uma geometria aproximada da torneira na zona pretendida (figura 3.11 - apresentada de um ângulo diferente para evidenciar a geometria obtida).

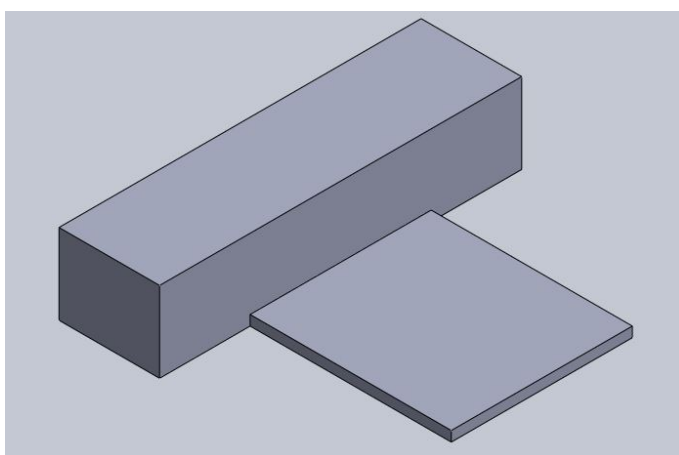


Figura 3.10: CAD do Bloco Auxiliar

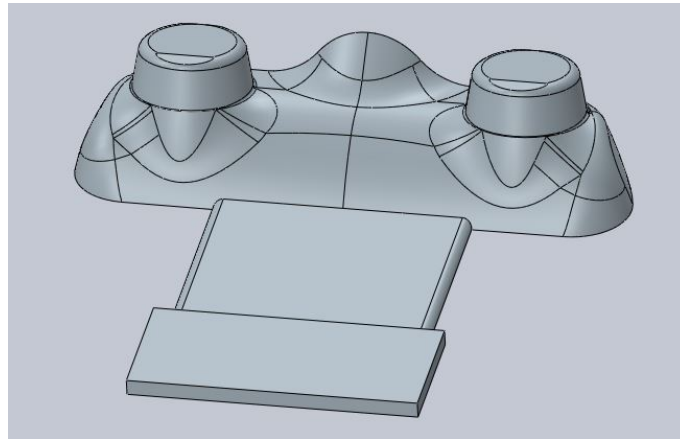


Figura 3.11: CAD do Bloco Auxiliar com a Geometria

Procedeu-se depois ao posicionamento dos machos nesta peça, obtendo dois machos: o esquerdo e direito. Optou-se por criar duas peças, ao invés de criar uma e de fazer o *mirror*, pois o autor considerou que poderia haver pequenas mudanças na geometria que não seriam recriadas com a precisão desejada. É apresentado na figura 3.12 o macho direito, sem cavidade de alimentador, já com a geometria adaptada à peça fundida. O macho esquerdo é, em tudo, semelhante.

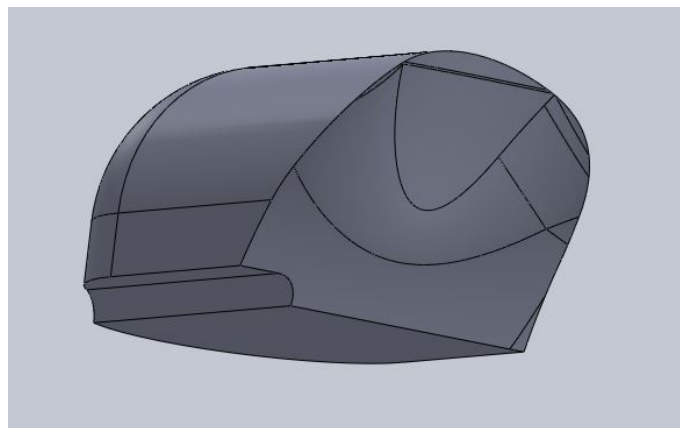


Figura 3.12: CAD do Macho com a Geometria da Peça

Na figura 3.13 é apresentado o mesmo macho, com a respetiva cavidade para o alimentador. O macho apresentado nesta figura apresenta uma aparência visual que recria areia, para possibilitar uma melhor visualização deste quando inserido na coquilha. Mais uma vez, o macho esquerdo é, em tudo, semelhante.

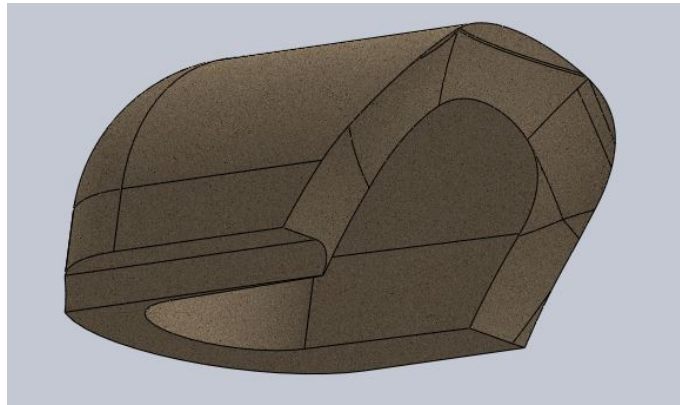


Figura 3.13: CAD do Macho com cavidade com a Geometria da Peça

Utilizando de novo a função de remoção de material do *SolidWorks*, retirou-se material à placa superior da coquilha correspondente aos machos de areia (sem cavidade do alimentador). O resultado final é apresentado na figura 3.14.

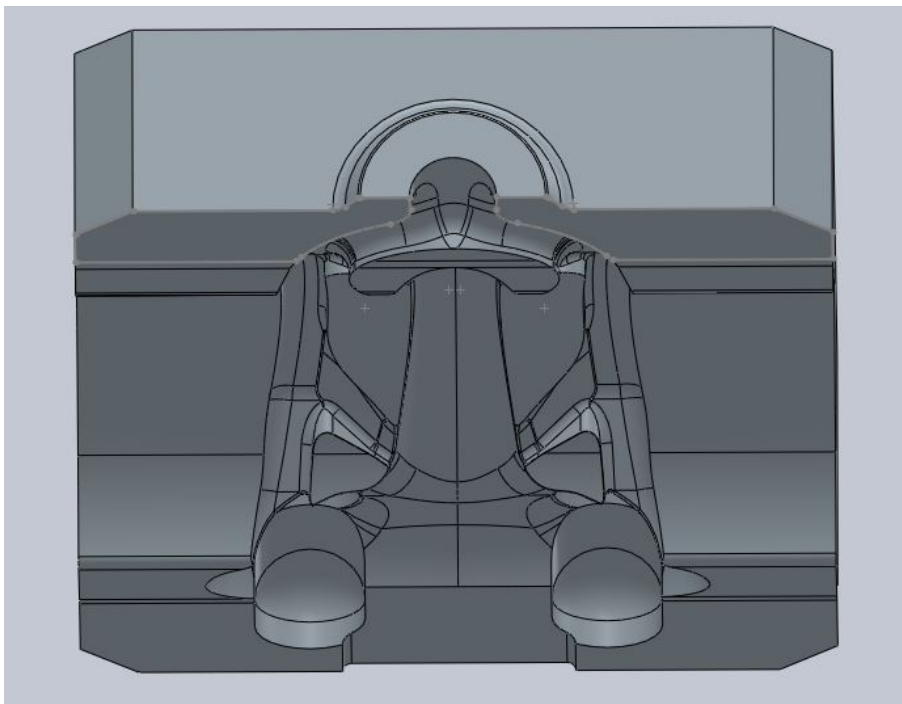


Figura 3.14: CAD da Coquilha com Cavidades para Machos

Finalmente, introduziram-se os machos nas respectivas cavidades da coquilha, conseguindo uma junção e adaptação à geometria da torneira perfeitas, como era expectável. O resultado é apresentado na figura 3.15:

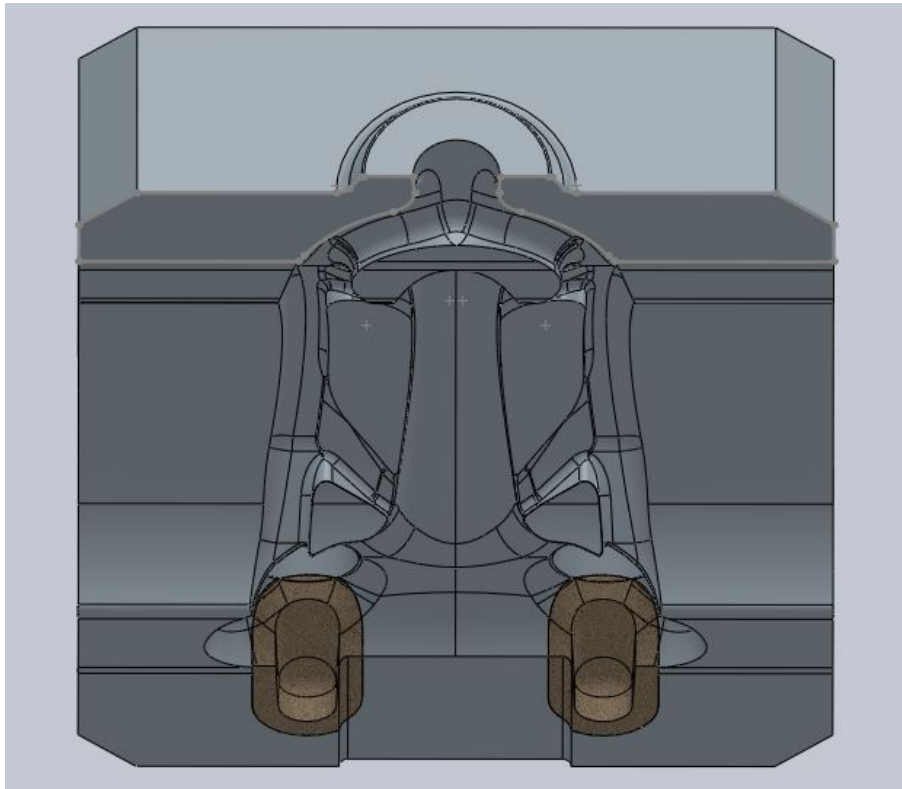


Figura 3.15: CAD da Coquilha com Machos

### 3.4 Análise e Simulação

O modelo 3D da coquilha completa (coquilha superior, inferior, macho interior e machos dos alimentadores) foi enviado à Dra. Nannan, colaboradora do *INEGI* para proceder à simulação no *ProCAST*.

A simulação é processada em duas etapas, uma de pré-processamento e uma de cálculo efetivo. No presente caso, o pré-processamento da geometria da torneira é um processo moroso e demorado: dado o elevado número de erros de geometria no modelo 3D da coquilha (modelo este fornecido pela empresa, sendo portanto estes erros fatores externos ao presente trabalho) que requerem correção, e a geometria complexa da torneira, é necessário perder uma grande quantidade de tempo na reparação destes problemas. O autor gostaria de reiterar o seu agradecimento à Dra. Nannan por todo o trabalho depositado no projeto, assim como pela sua preciosa ajuda no que toca a este tema.

Um dos problemas que surgiu no pré-processamento da torneira foi o da espessura mínima entre o alimentador e um *chill* existente na coquilha, como é evidenciado na figura 3.16. A existência de uma espessura tão fina deu origem a um grande número de problemas na geração de malha nesta zona.

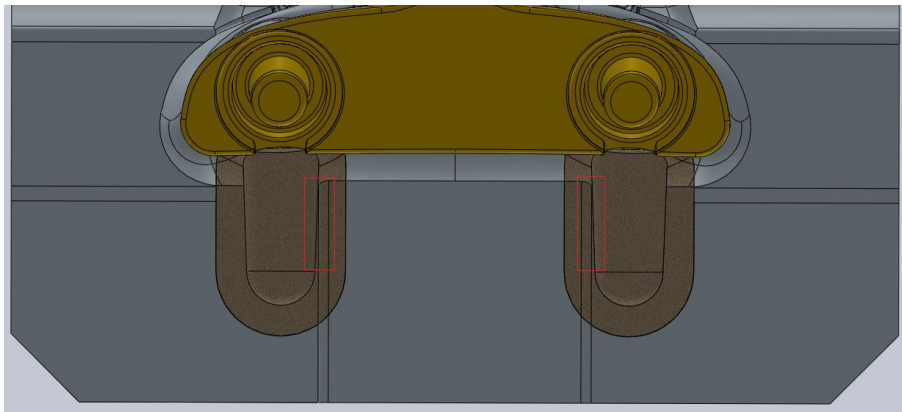


Figura 3.16: Vista da Zona que origina espessura 0. As zonas dentro dos retângulos vermelhos são as zonas em estudo.

Outra zona que causou erros no pré-processamento da geometria foi, também, uma zona de espessura fina que dava origem a uma pequena "barbatana" (*fin*) na junção macho+alimentador+coquilha. Este defeito só surgiu na simulação, sendo que era difícil encontrá-lo na fase de modelação 3D dos machos. A zona problemática está evidenciada na figura 3.17.

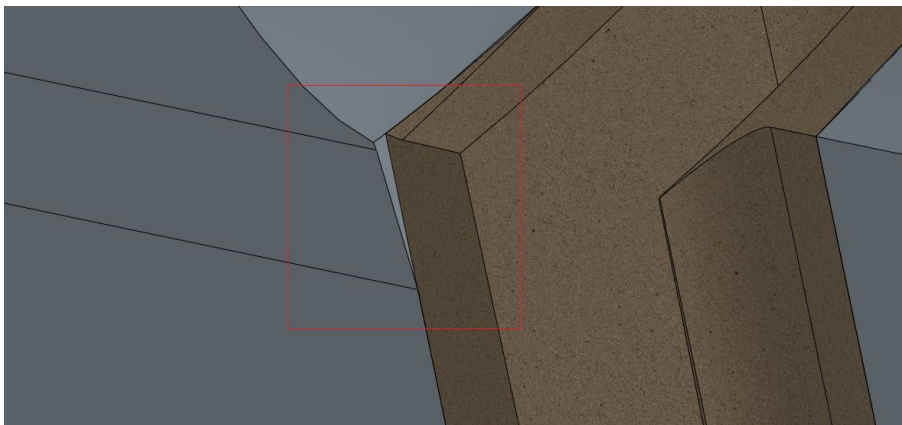


Figura 3.17: Vista da Zona que origina espessura fina. A zona dentro do retângulo vermelho é a zona em estudo.

O aparecimento destes problemas, apenas passíveis de serem encontrados na fase do pré-processamento já no *software* de simulação, é um exemplo perfeito da grande interligação que tem de existir entre os vários intervenientes no processo de projeto e correção de uma peça; pode também ser realçado o incomensurável valor da simulação numérica, dado que estes problemas podem ser tratados quando surgem em ambiente virtual sem qualquer perda de materiais e gasto

excessivo e inútil de custos, quando de outra maneira apenas surgiriam nas primeiras peças fundidas e analisadas, sendo que depois era necessário alterar a geometria dos machos ou da coquilha, trazendo custos adicionais.

A resolução destes problemas passou por recalcular a posição dos alimentadores (e, diretamente, dos machos) na coquilha, de modo a que estes ficassem junto ao *chill* desta. Alterou-se também ligeiramente a geometria destes, para recriar a geometria da sua nova posição. Quanto à zona que dava origem à barbatana, optou-se por aumentar ligeiramente o macho de areia para que este recriasse a geometria inferior da coquilha, eliminando assim este vazio. Tais correções são visíveis nas figuras 3.18 e 3.19, respetivamente.

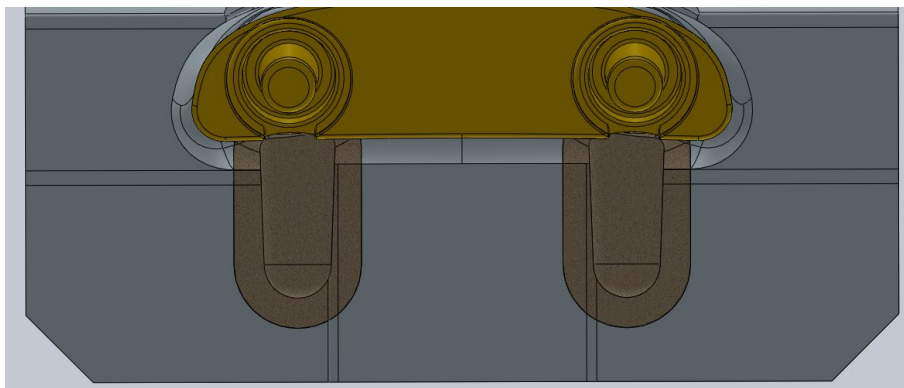


Figura 3.18: Vista da Zona que origina espessura 0, corrigida.

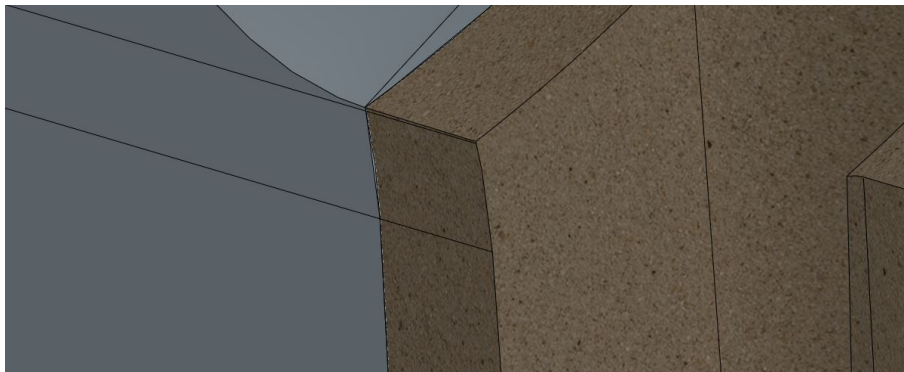


Figura 3.19: Vista da Zona que origina espessura fina, corrigida.

### 3.4.1 Simulações

As simulações foram realizadas pela Dra. Song Nannan, colaboradora do *INEGI*, num computador com as características apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características do PC Utilizado

Processador	Intel®Core™ i7-4770K @ 3.50GHz
Memória RAM	16 GB
Sistema Operativo	Windows 7 Enterprise SP1
Versão do <i>Software</i>	Visual-Environment 9.6



## Capítulo 4

# Resultados Experimentais

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações e a sua análise à luz do problema que está a ser tratado.

Como foi referido no capítulo anterior, o modelo 3D da moldação com os respetivos machos de areia foi enviado para a Dra. Song Nannan, colaboradora do *INEGI*, que procedeu às simulações de arrefecimento e solidificação da peça na coquilha.

A liga utilizada para a peça foi uma liga muito semelhante à utilizada pela CIFIAL atualmente (presente na tabela 2.6), sem chumbo e com a adição de Bismuto. Apresenta-se, na tabela 4.1, a composição da liga utilizada na simulação, assim como a da liga da CIFIAL:

Tabela 4.1: Liga Utilizada na Simulação VS Liga Utilizada na CIFIAL.

%	Liga do <i>Software</i>	Liga da <i>CIFIAL</i>
Al	0,6	0,5 - 0,7
Bi	0,7	0,6 - 0,8
Fe	0,15	0,2
Mn	0,03	0,03
Ni	0,1	0,1
Pb	0,1	0,1
Si	0,05	0,05
Sn	0,2	0,2
Zn	37	≈36,92
Fe+Sn	-	0,35

Mais propriedades relevantes desta liga encontram-se no anexo F.

Na tabela 4.2 estão apresentadas as condições iniciais da simulação.

Tabela 4.2: Condições Iniciais da Simulação.

Peça	Material	Temperatura Inicial (°C)
Coquilha	Cu-Be	170
Machos	Areia de Sílica	120
Peça Vazada	CuZnBi	950
Pressão: 0,56 bar		
Arrefecimento ao ar		

Na figura 4.1 é visível o modelo 3D da torneira resultante da nova geometria de alimentadores.

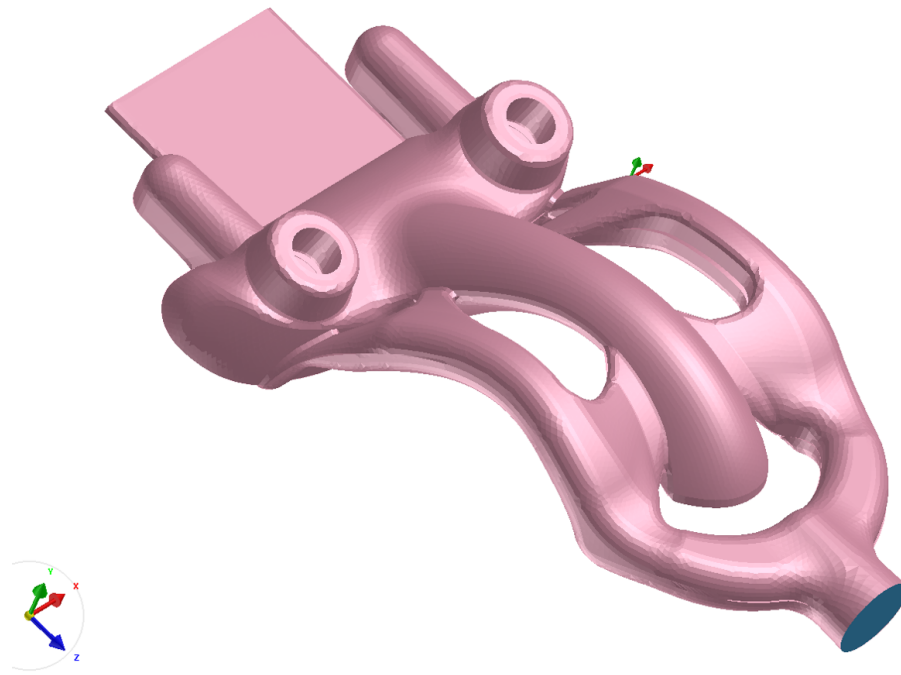


Figura 4.1: Vista do Modelo 3D da Torneira com novos alimentadores.

Como é possível observar na figura, os novos alimentadores são consideravelmente grandes, apresentando um módulo de 4,84 mm (equação 4.2).

$$M_r = \frac{16978,73\text{mm}^3}{3505,93\text{mm}^3} \quad (4.1)$$

$$M_r = 4,84\text{mm} \quad (4.2)$$

Os respetivos machos apresentam-se na figura 4.2.

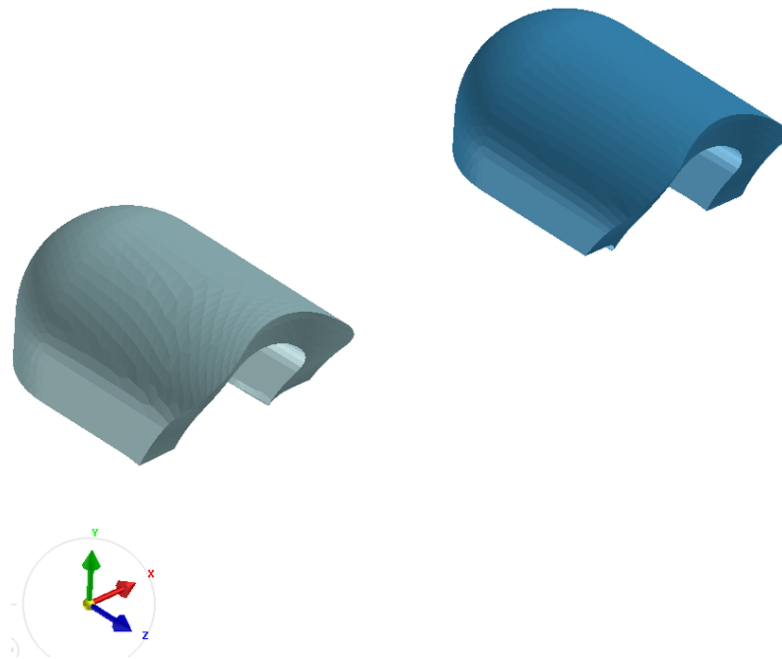


Figura 4.2: Vista do Modelo 3D dos novos Machos.

Após a simulação, que é sempre um processo iterativo devido às correções de geometria que é necessário efetuar na coquilha, obteve-se o modelo da solidificação da torneira com a geometria proposta.

Efetuando cortes para obter vistas de secção das zonas que pretendemos estudar, os alimentadores, e vendo a formação de rechupes e a fracção sólida, obtiveram-se as seguintes imagens, [4.3](#), [4.4](#) e [4.5](#), apresentadas nas páginas seguintes.

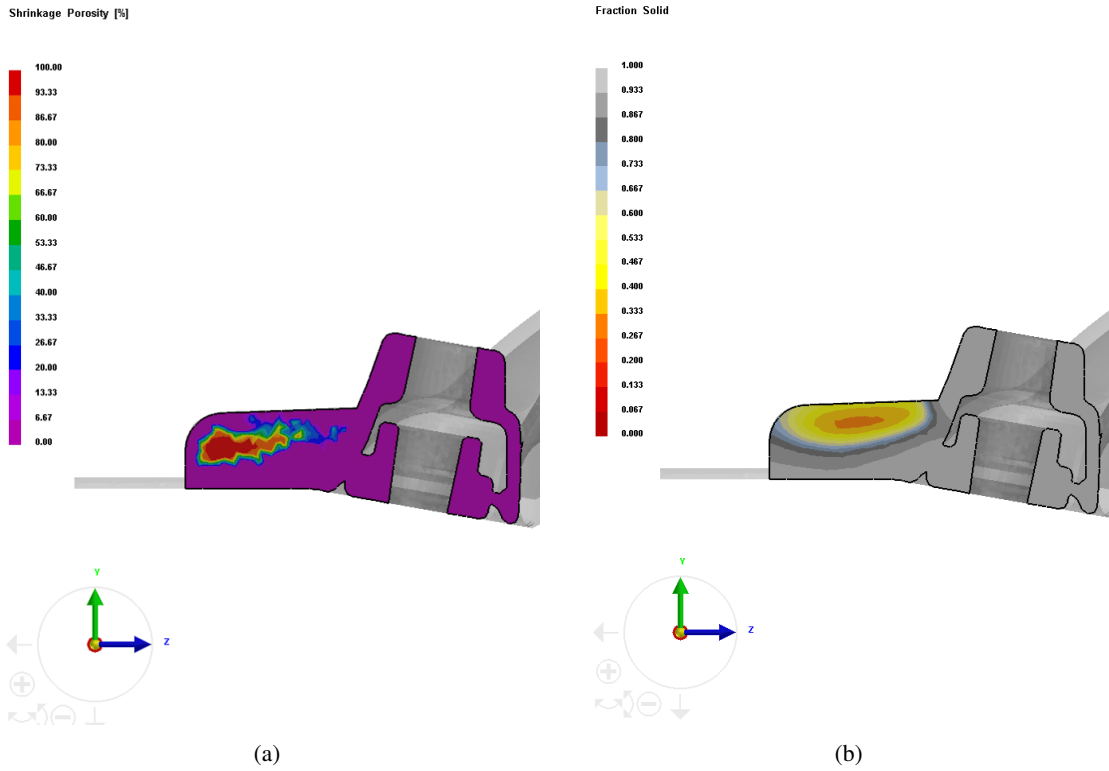


Figura 4.3: Vista do Corte na Secção Crítica - Plano YZ. Formação de rechupes (a) e Fracção Sólida (b).

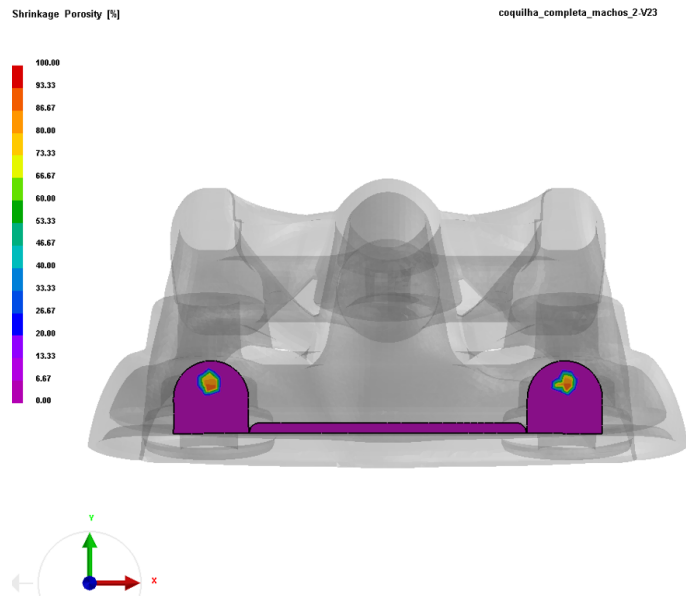


Figura 4.4: Vista do Corte na Secção Crítica, Formação de rechupes no alimentador - Plano XY.

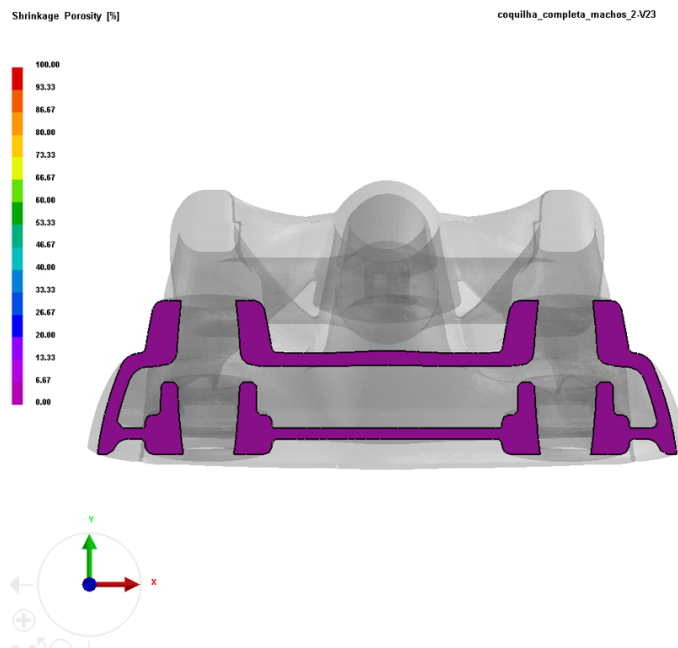


Figura 4.5: Vista do Corte na Secção Crítica, Formação de rechupes na zona crítica interior - Plano XY.

## 4.1 Análise aos resultados

Procedendo a uma análise mais detalhada de cada imagem, podemos retirar conclusões e auferir a validade das propostas simuladas.

Atentando na imagem 4.3(a), verifica-se que a formação de rechupes continua a existir (como seria expectável), mas foi possível transladar o aparecimento destes para a zona do alimentador tal como queríamos.

Representa-se na figura 4.6 a vista do corte no plano YZ do alimentador com a formação de rechupes, dentro do círculo vermelho, e as zonas que serão removidas na maquinagem da torneira: as zonas à esquerda da linha vermelha serão removidas, evidenciadas pelas setas vermelhas, e as zonas à direita da linha vermelha ficarão na peça final, evidenciadas pelas setas verdes.

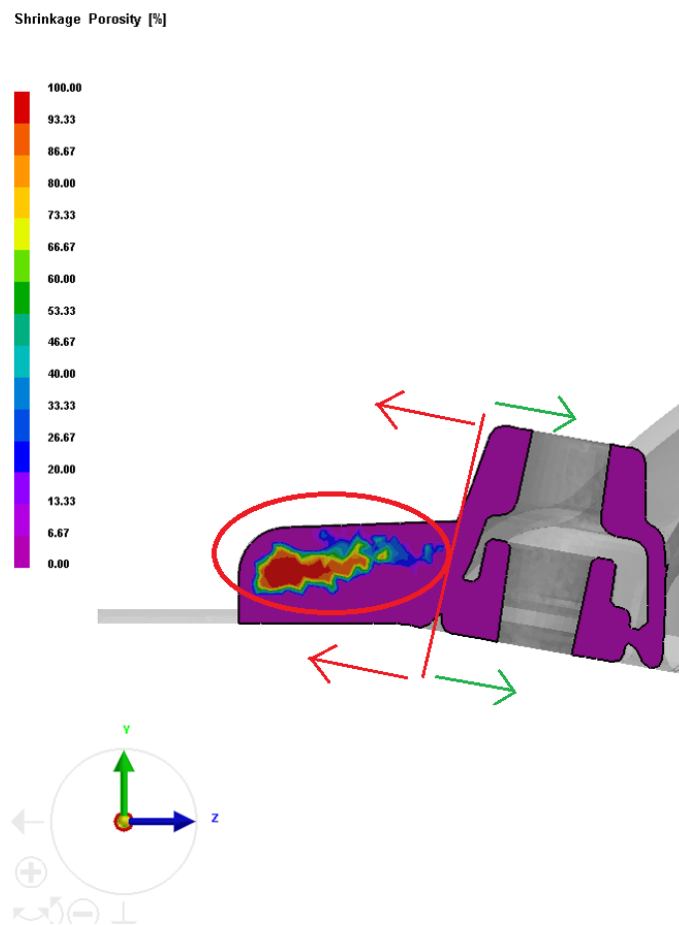


Figura 4.6: Vista do Corte na Secção Crítica, Formação de Rechupes - Plano YZ, com sinalização.

Como se vê, foi possível concentrar toda a formação de rechupes na zona que será removida na maquinagem, o que é considerado um bom resultado, que vai de encontro aos nossos objetivos. Apresenta-se, na página seguinte, a imagem 4.7, onde se representa a fracção sólida do alimentador no mesmo plano de corte. Da análise da figura, podemos concluir que as últimas zonas a solidificar serão inteiramente dentro do alimentador, sendo que esta imagem evidencia a solidificação direccional que foi possível atingir com a introdução do conjunto alimentador + macho.

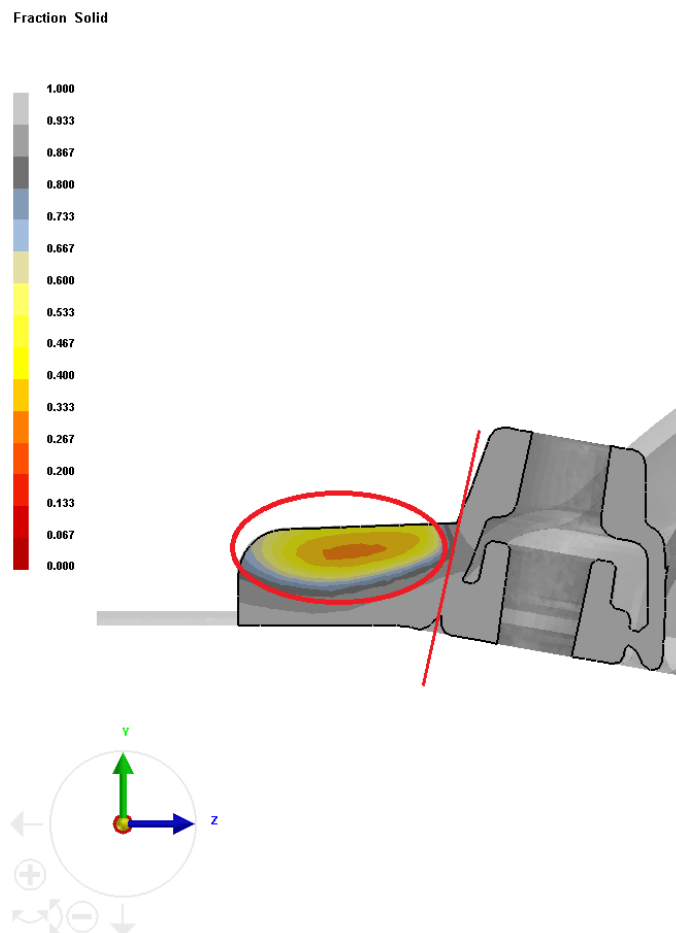


Figura 4.7: Vista do Corte na Secção Crítica, Fracção Sólida - Plano YZ, com sinalização.

A figura 4.4 mostra uma secção de corte que atravessa o alimentador, no plano XY, em que é visível a formação de rechupes no interior do alimentador no centro. Conjugando esta informação com a obtida pela análise da imagem 4.6, podemos concluir que o rechupe fica localizado no centro do alimentador relativamente ao plano XY, e junto à extremidade mais afastada da peça principal relativamente ao plano YZ.

A figura 4.5 mostra-nos uma secção de corte que atravessa a zona interior da torneira no plano XY, evidenciando a ausência de rechupes na zona onde estes apareciam previamente.

## 4.2 Conclusões

Da análise da bibliografia consultada no capítulo 2, dos resultados apresentados no presente capítulo e dos resultados previamente estudados (e apresentados no anexo A), podemos concluir que:

- A introdução de um alimentador simples na coquilha metálica, sem macho exterior, não soluciona o problema inicial do aparecimento de rechupes;
- A utilização de um macho de areia exterior, que rodeia o alimentador, é uma abordagem prática e da qual advêm bons resultados; no entanto, podemos afirmar com certeza de que o macho tem de ser bem dimensionado para estar completamente em contacto com a torneira e recriar, da maneira mais fiel possível, a geometria desta. Este pequeno problema prende-se apenas com a simulação, dado que, como já foi referido anteriormente, o metal vazado irá preencher todos os vazios que encontrar, inclusivé os que resultarem de falhas de geometria entre os machos e a coquilha; podemos concluir então que os machos exteriores devem, ao máximo, aproximar as suas faces de contacto com a torneira a esta e ao fim do seu buraco respetivo na coquilha;
- Uma possível mudança de liga poderia, hipoteticamente, dar origem a resultados semelhantes sem a introdução de um alimentador; no entanto, na prática, essa mudança é impossível e não tem grande relevância, pois a mudança da liga implicaria um sem número de problemas e não é, de todo, uma opção viável. A liga foi definida entre a *CIFIAL* e o cliente, pelo que é difícil requalificar uma nova liga;
- A introdução de elementos refinadores de grão na liga, tais como o Boro (tal como é referenciado na tese de Castro (2008)), pode ajudar à prevenção da formação destes rechupes; no entanto, esta opção é inviável por várias razões, entre elas o facto de que a *CIFIAL* compra a liga em lingotes e não faz adição de elementos na sua fundição, e de que a afinação da composição química de uma liga é um processo de iteração moroso e dispendioso, processo este que está fora de questão no panorama atual.

Podemos prever, com algum grau de certeza, que a introdução deste sistema na prática irá trazer melhorias, se não solucionar completamente, ao problema tratado: graças à análise dos defeitos nas torneiras fornecidas e às simulações preliminares, o aparecimento dos defeitos nas simulações coincidia praticamente a 100% com a localização destes nas peças reais.

É, no entanto, importante ter em conta os inconvenientes que esta solução acarreta: a criação de uma nova caixa de machos e a modificação da coquilha existente ou a criação de uma nova são duas questões que se traduzem num investimento considerável.

Conclui-se, portanto, que a metodologia utilizada neste trabalho cumpriu os objetivos e surtiu os efeitos desejados. A introdução do sistema alimentador + macho exterior funcionou, em termos teóricos, e aguarda apenas validação prática.



## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Satisfação dos Objetivos

A presente dissertação abordou o tema de enchimento e solidificação de peças em ligas de cobre obtidas por baixa pressão, recorrendo para tal à utilização de *software* de modelação numérica para simular enchimentos e solidificações. Entre os objetivos do trabalho, um dos mais concretos era o de estudar a formação de defeitos, nomeadamente rechupes e micro-rechupes, numa peça em latão bifásico obtida pelo processo de fundição por baixa pressão; estudou-se o mecanismo de formação do defeito, analisaram-se possíveis soluções e implementou-se, teoricamente, a que foi considerada mais conveniente.

Sabia-se de antemão, pelo trabalho realizado no *INEGI*, que no que toca aos mecanismos de formação dos defeitos as simulações realizadas no *software* utilizado validam inteiramente os resultados práticos das peças vazadas, pelo que podemos afirmar com certeza que os resultados são válidos para o trabalho, correspondendo os defeitos existentes nas simulações aos defeitos existentes nas peças vazadas.

A modelação numérica mostra que os resultados obtidos vão de encontro aos objetivos definidos: o dimensionamento do alimentador e do sistema alimentador e macho exterior apresentam melhorias visíveis na prevenção da formação do defeito nas zonas críticas, concentrando-se este no alimentador dimensionado para o caso. Conseguiu-se, portanto, eliminar o defeito existente; conclui-se também, na secção 4.2 pela análise dos resultados práticos, que a metodologia utilizada neste trabalho surtiu os efeitos desejados cumprindo por completo os objetivos definidos inicialmente.

No capítulo relativo à revisão bibliográfica está presente uma compilação de diversas fontes no que toca ao processo de fundição e à fundição de ligas de cobre, compilação esta que não se encontrava presente em praticamente literatura nenhuma.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Quanto a sugestões de trabalhos futuros, a primeira passará por proceder à validação prática dos resultados da simulação, recriando na fundição as soluções propostas e simuladas para auferir a qualidade dos resultados. Se os resultados provenientes da fundição forem coincidentes com os da simulação, podemos afirmar ainda com maior grau de certeza que o *software* de simulação é uma mais-valia a ter no projeto de peças para fundição para o presente caso e para a *CIFIAL*.

Em linha com a ideia anterior, seria interessante, depois da validação prática das simulações, efetuar uma análise de custos interna na empresa para perceber se seria benéfico ou não adquirir um *software* semelhante para uso interno, ou recorrer sistematicamente à ajuda do *INEGI*, por exemplo, para realizar simulação.

A abordagem ao problema detalhada no presente trabalho é apenas uma de muitas; a outra possível abordagem, que com certeza poderá surtir resultados igualmente satisfatórios, consiste numa análise cuidada e detalhada à constituição química da liga, tendo em conta possíveis afinamentos de grão e novas "receitas" no que toca à adição de elementos de liga. Ao longo da pesquisa bibliográfica eram várias vezes referidos elementos sobre os quais a sua influência na liga e no resultado final ainda não está completamente estudado (desde a influência do Bismuto como substituto do Chumbo, até à adição de Boro como elemento afinador de grão). Seria interessante efetuar um trabalho centrado no mesmo tema, mas abordando-o do ponto de vista metalúrgico ao invés do ponto de vista da fundição.

## Referências

Requirements for low lead plumbing products in california, 2011.

Ces edupack, 2013.

Lamineries matthey sa, 2013.

Ligas de cobre - latão para fundição cuzn40, 1979.

Rheocast.com - c85800 yellow brass alloy, 2014.

Schmelzmetall - material data sheet - hovadur ccnb.

V. J. Keast A. La Fontaine. Compositional distributions in classical and lead-free brasses. *Materials Characterization*, 57:424–429, 2006.

Jens Bergström Anders Persson, Sture Hogmark. Failure modes in field-tested brass die casting dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 148:108–118, 2004.

S. L. Cockcroft B. Zhang, D. M. Maijer. Development of a 3-d thermal model os the low-pressure die-cast (lpdc) process of a356 aluminum alloy wheels. *Materials Science & Engineering, A*, 464:295–305, 2007.

Peter Beeley. *Foundry Technology*. Butterworth-Heinemann, 2001.

John Brown. *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, capítulo 10 - Low Pressure and Gravity Diecasting, páginas 118–134. Butterworth Heinemann, 1999.

W. A. Butler. *Die Casting (Permanent Mold)*, páginas 2147–2152. Elsevier Science Ltd., 2001.

John Campbell. *The new Metallurgy of Cast Metals: Castings*. Butterworth-Heinemann, 2003.

Gabriel de Sousa Castro. *Estudo e otimização da liga de latão utilizada na GROHE Portugal S A*. tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

Zhangxin Chen. *The Finite Element Method: Its Fundamentals and Applications in Engineering*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011.

Concast. *Concast Metal Products*. Concast, 2014.

T. T. Nguyen D. R. Gunasegaram, D. J. Farnsworth. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulation based on design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 209:1209–1219, 2009.

António Pinto Barbedo de Magalhães. *Introdução à Engenharia Mecânica*. PubIndustria, 2014.

- António Selada António J. Pontes António M. Brito Domingos Granja, Salvado Henriques. *Manual do Projectista - Materiais para Moldes e Técnicas de Fabrico*. Centimfe, 2003.
- Induga Engineering. Induga low pressure die casting machine 1011, 2013.
- B. Bonatto M. Botter F. Bonollo, J. Urban. Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark. *La Metallurgia Italiana*, 6:23–32, 2005.
- José Manuel Junqueira Fernando Portela de Castro. *Latões para Fundição*. CETEM, 1996.
- IARC International Agency for Research on Cancer. Beryllium and beryllium compounds. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Man*, 100 C:95 – 120.
- P. Greenfield. *Engineering Applications of Beryllium*. Mills & Boon Limited, 1971.
- ASM International. *ASM Handbook - Volume 15 - Casting*. ASM International, 1998.
- José Manuel Junqueira. Influência dos elementos de liga nos latões - aspetos metalográficos. *Fundição*, 244:4 – 6, 2007.
- C. González-Rivera M. A. L. Hernandez-Rodriguez M. Martinez-Hernandez, A. Juarez-Hernandez. Bismuth segregation and crack formation on a free lead yellow brass tap. *Engineering Failure Analysis*, 28:63–68, 2013.
- António Alberto Caetano Monteiro. *Estudo do comportamento térmico de moldações metálicas para fundição, aplicando o método das diferenças finitas generalizadas*. tese de doutoramento, Universidade do Minho, 1996.
- The Institute of British Foundrymen. *Atlas of Defects in Castings*. The Institute of British Foundrymen, 1961.
- American Foundrymen's Society. *Casting Copper-Base Alloys*. American Foundrymen's Society, 1984.
- T. Ramesh-Chaitali Ray Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. Pearson Education Limited, 2012.
- E. G. West. *Copper and its alloys*. Ellis Horwood Limited, 1982.
- Wikipedia. Finite difference method - wikipedia, the free encyclopedia, a. URL [en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_difference\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference_method).
- Wikipedia. Finite element method - wikipedia, the free encyclopedia, b. URL [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method).
- Wikipedia. Moore's law - wikipedia, the free encyclopedia, c. URL [http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law).
- S. L. Maijer D. M. Zhu J. D. Phillion A. B. Zhang, B. Cockcroft. Casting defects in low-pressure die-cast aluminum alloy wheels. *JOM*, 57:36–43, 2005.

## **Anexos**



## **Anexo A**

# **Análise aos defeitos das peças da CIFIAL**

O relatório disponibilizado estuda um problema de fugas em torneiras da CIFIAL na zona em que se processa a ligação da zona pressurizada com a zona à pressão ambiente. O estudo foca-se no problema do aparecimento de rechupes e consequentes micro-rechupes. Todas as informações e fotografias apresentadas foram retiradas do documento e das apresentações fornecidas e destinam-se apenas a efeitos de estudo científico para o presente documento.

No relatório disponibilizado analisam-se 5 torneiras diferentes:

- 2 peças cortadas na CIFIAL - sem fugas, com cortes realizados no sentido do eixo da torneira - (A) e (B);
- 1 torneira com muitas fugas cortada transversalmente ao eixo da torneira - (C);
- 2 torneiras com fugas cortadas transversalmente aos eixos das torneiras - (D) e (E);

Das zonas com fugas conclui-se que estas são originadas por zonas mais maciças de material (quer pela geometria do desenho quer pela espessura elevada dos machos de areia) que, sendo as últimas a arrefecer, concentram nelas grande parte dos rechupes e micro-rechupes da peça; os rechupes podem ser eliminados por maquinagem posterior (o que se verifica), mas os micro-rechupes ficam presentes e são os responsáveis pelas fugas observadas.

Uma solução proposta seria a de projetar um novo sistema de gitagem e, conseqüentemente, uma nova coquilha que incluísse um sistema de gitagem do lado oposto ao existente atualmente mas com alimentadores no final dos tubos (zona afetada pelos rechupes e micro-rechupes).

### **A.1 Imagens das Fugas Estudadas - INEGI**

Nesta parte irão ser reproduzidas todas as imagens presentes no relatório disponibilizado, com comentários para melhor percepção. Ver páginas seguintes e comentários no final do documento:

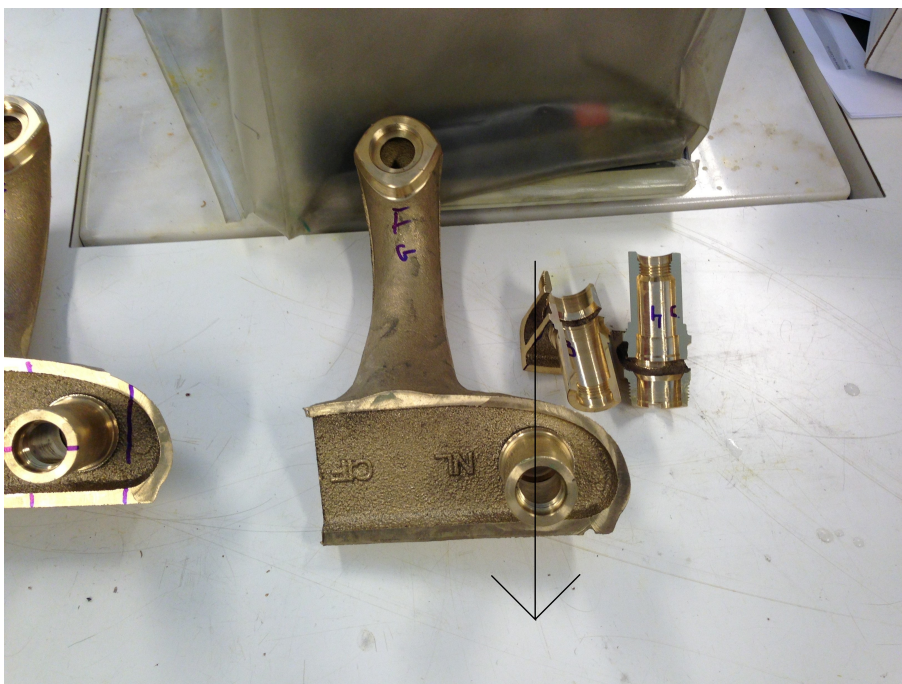


Figura A.1: Indicação do corte e polimento nas torneiras retiradas do controle



Figura A.2: Cortes na torneira com muitas fugas e com poucas fugas



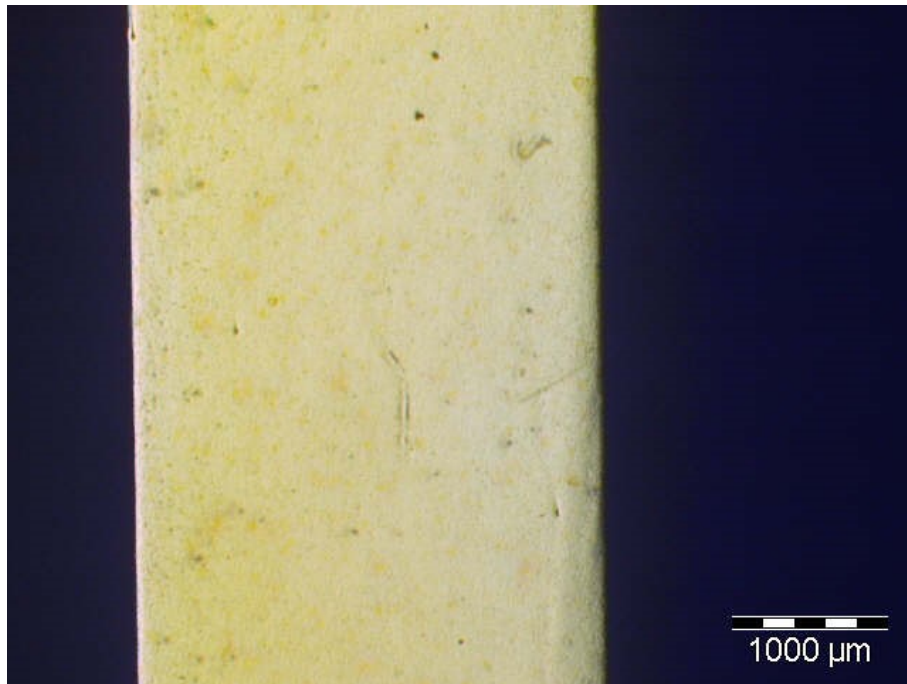


Figura A.3: Peça (A) - Sem Fuga - 23×

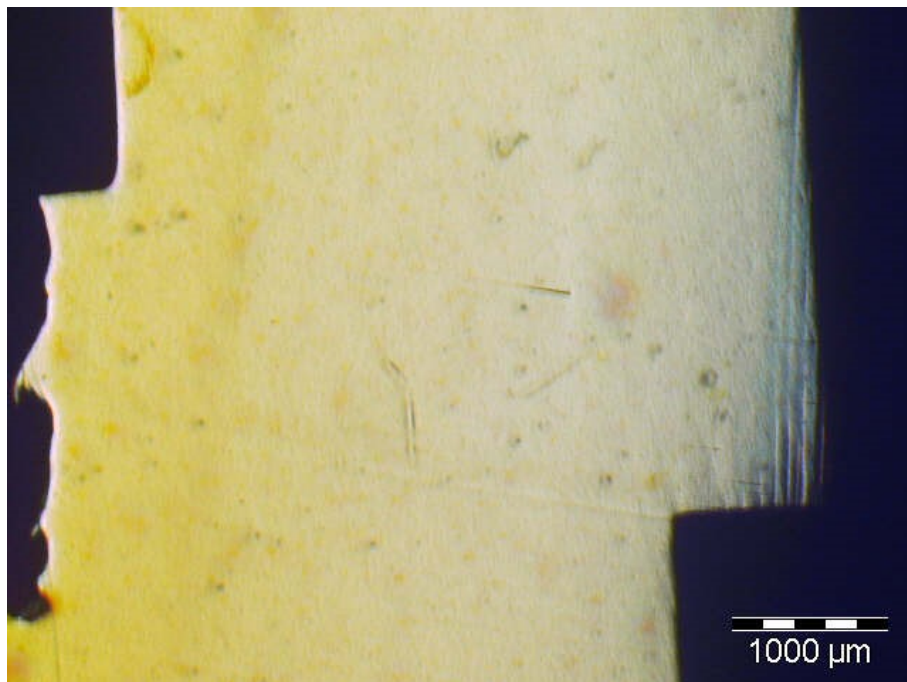


Figura A.4: Peça (A) - Sem Fuga - 23×

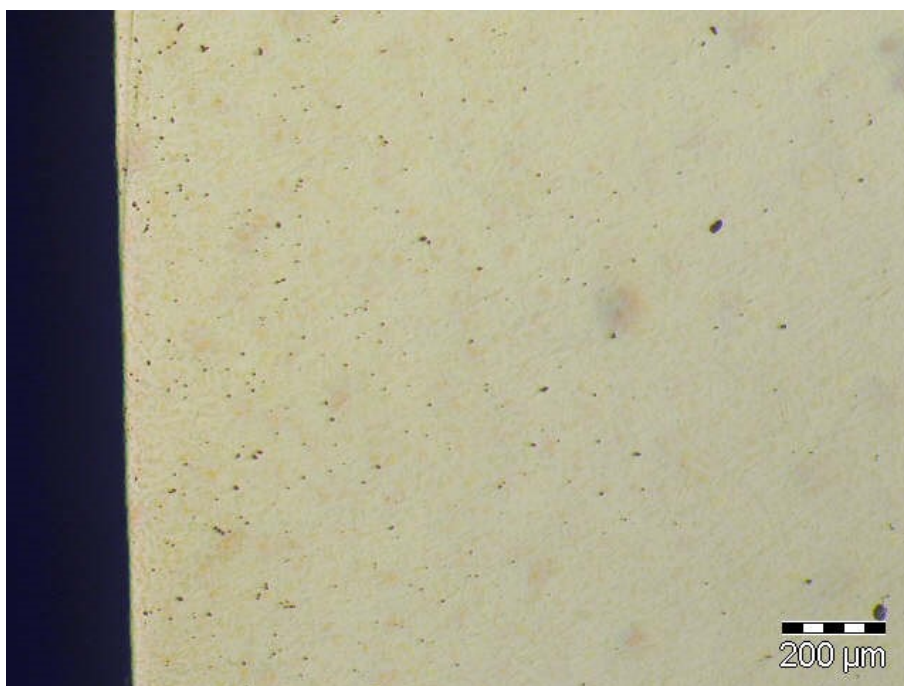


Figura A.5: Peça (A) - Sem Fuga - 75×

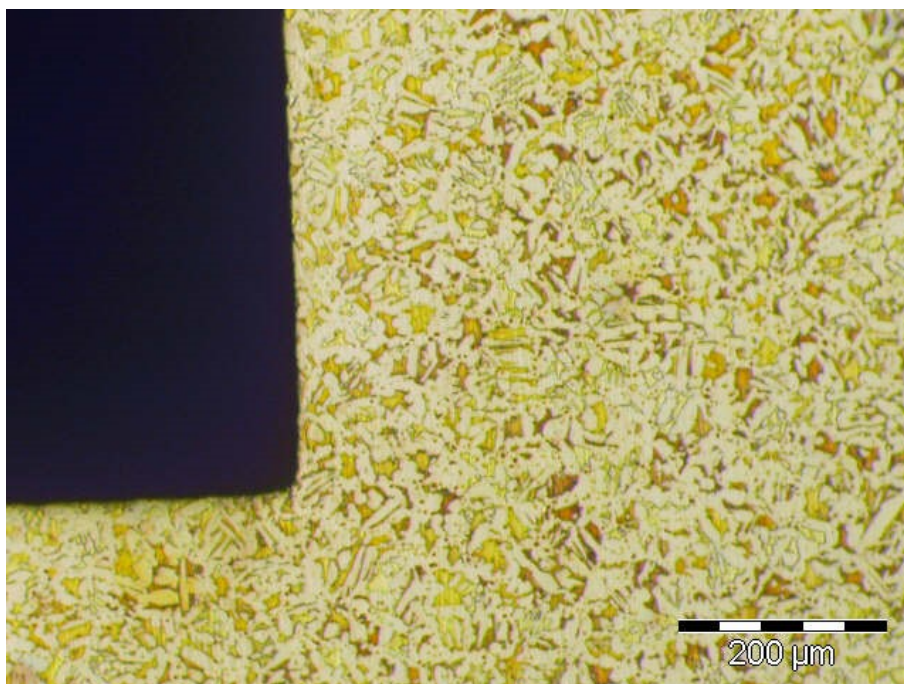


Figura A.6: Peça (A) - Sem Fuga - Com Ataque - 150×

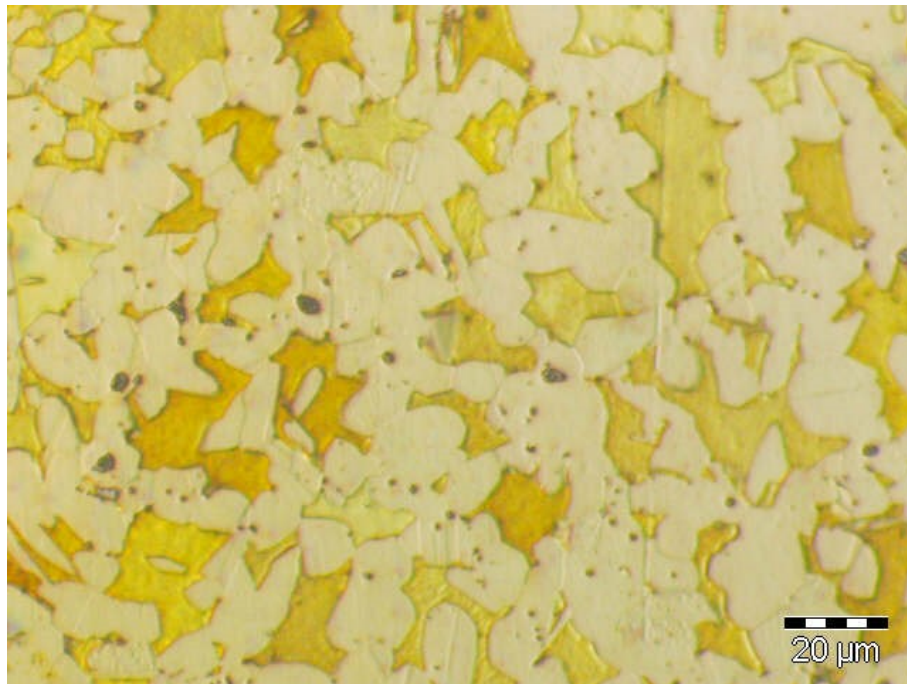


Figura A.7: Peça (A) - Sem Fuga - Com Ataque - 750×

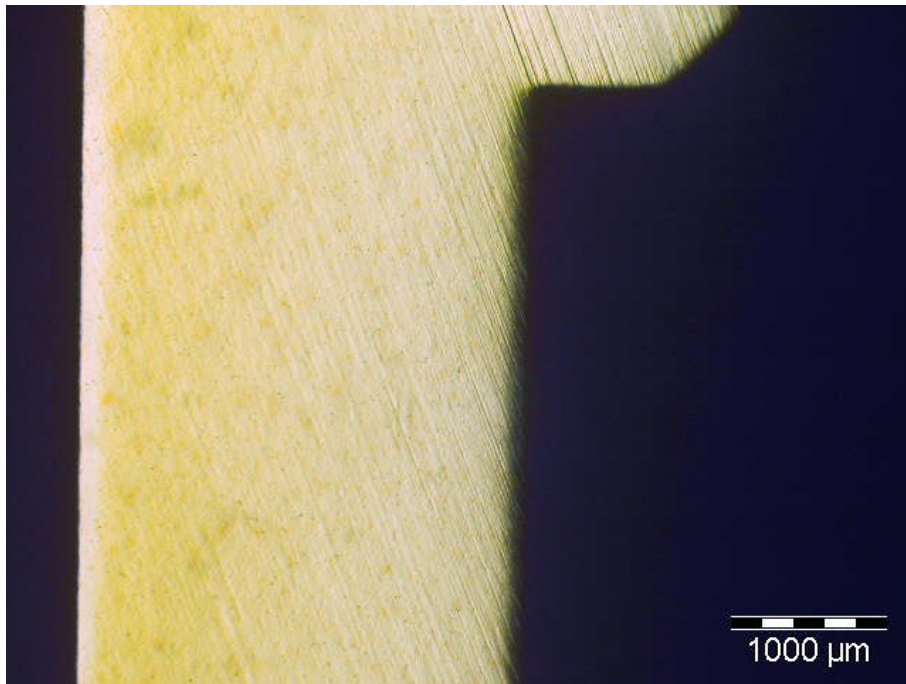


Figura A.8: Peça (B) - Sem Fuga - 23×

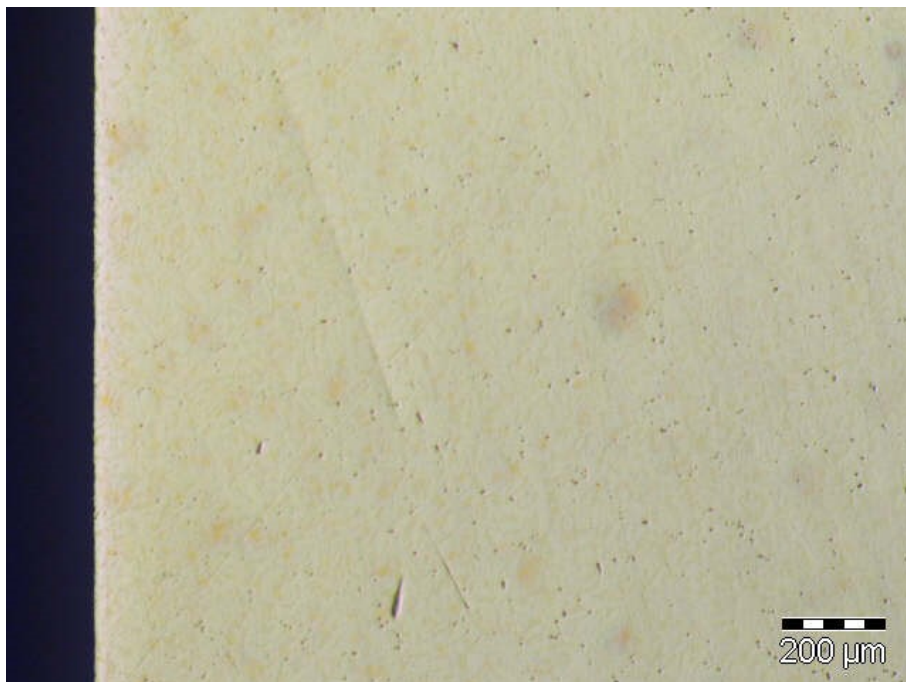


Figura A.9: Peça (B) - Sem Fuga - 75×

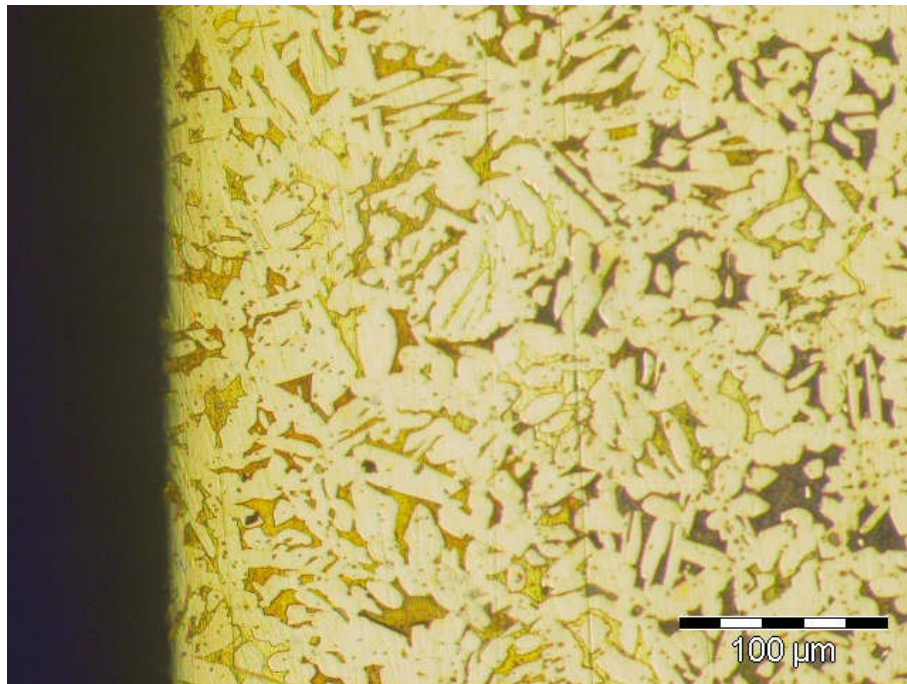


Figura A.10: Peça (B) - Sem Fuga - Com Ataque - 300×

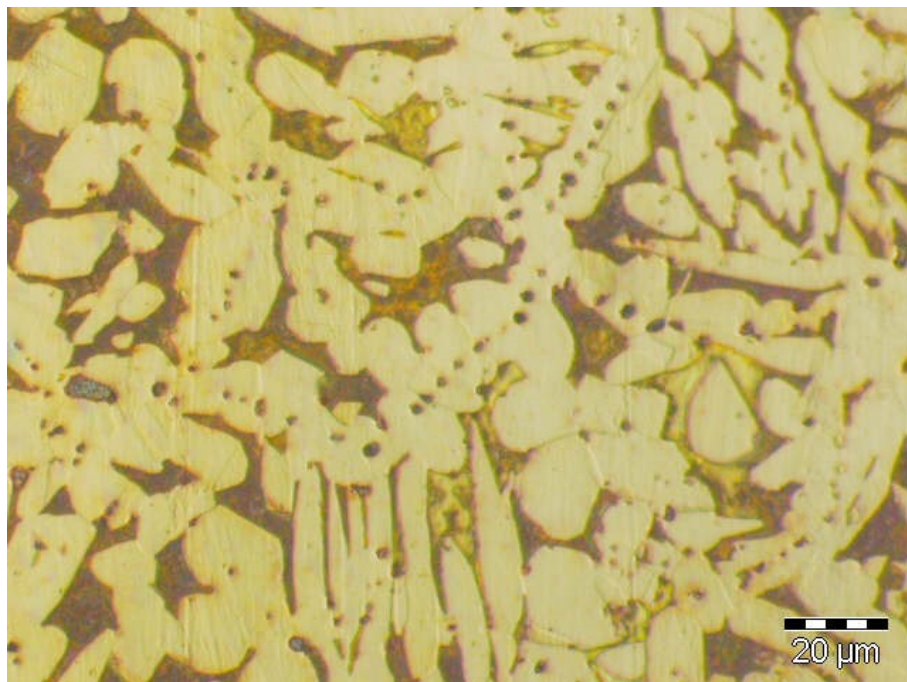


Figura A.11: Peça (B) - Sem Fuga - 750×

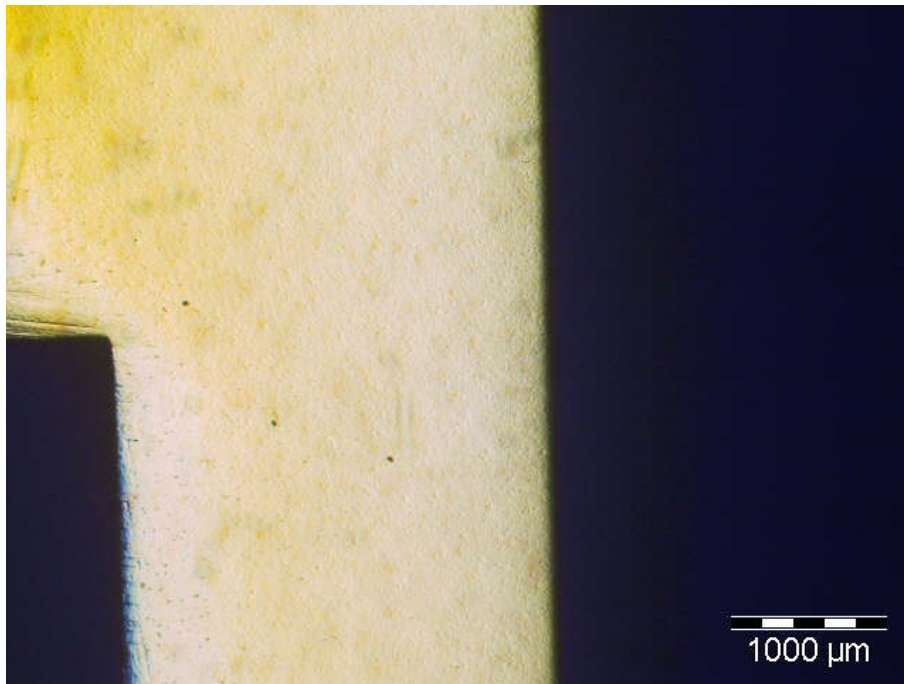


Figura A.12: Peça (C) - Com Fuga - 23×

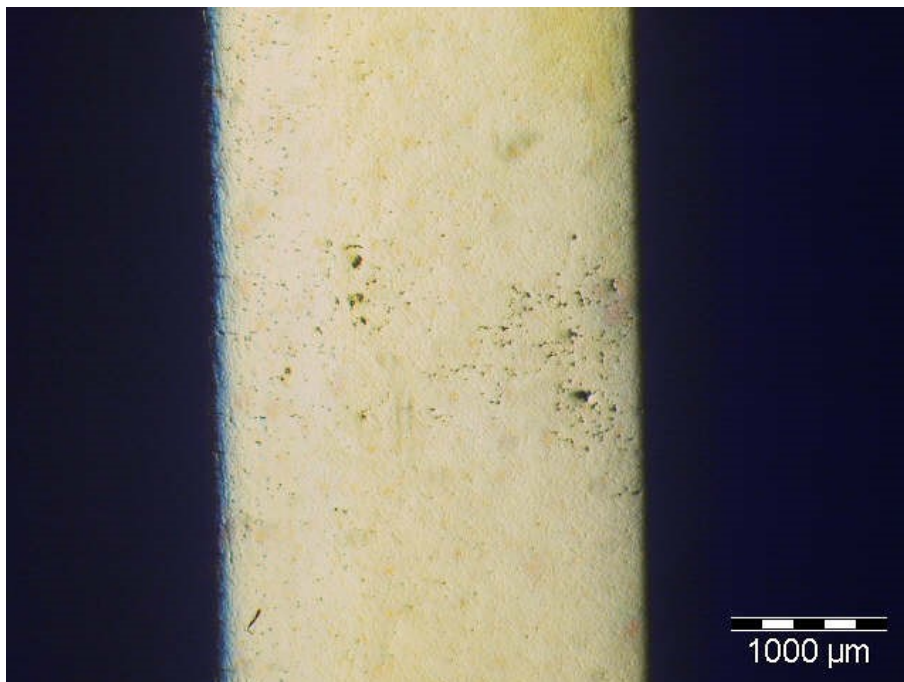


Figura A.13: Peça (C) - Com Fuga Grande - Dentro - 23×

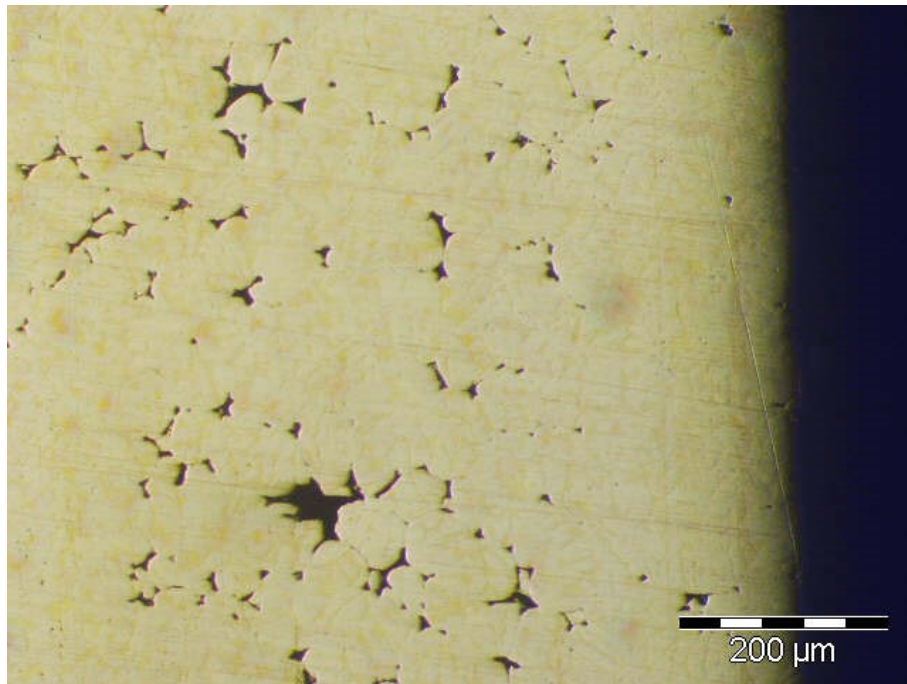


Figura A.14: Peça (C) - Com Fuga Grande - Dentro - 150×

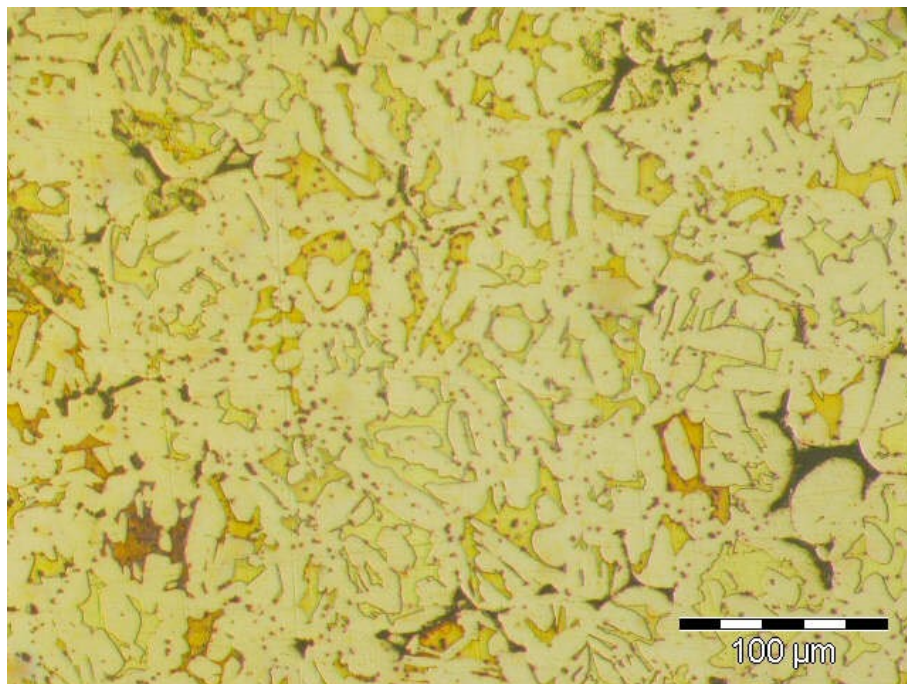


Figura A.15: Peça (C) - Com Fuga Grande - Com Ataque - Dentro - 300×

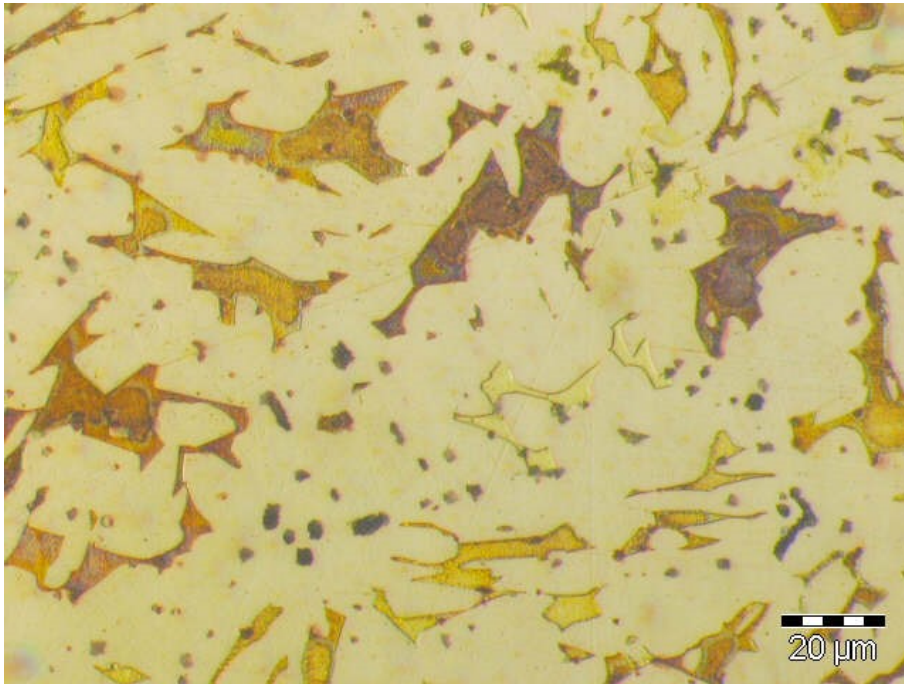


Figura A.16: Peça (C) - Com Fuga Grande - Com Ataque - Dentro - 750×



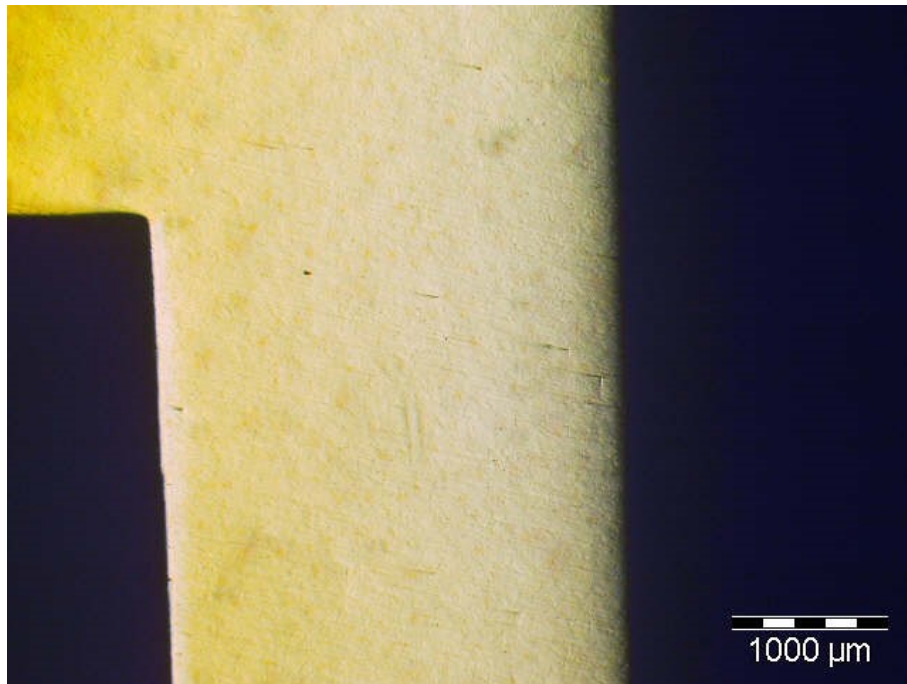


Figura A.17: Peça (C) ? - Com Fuga Grande - 23×



Figura A.18: Peça (C) ? - Com Fuga Grande - Dentro - 23×

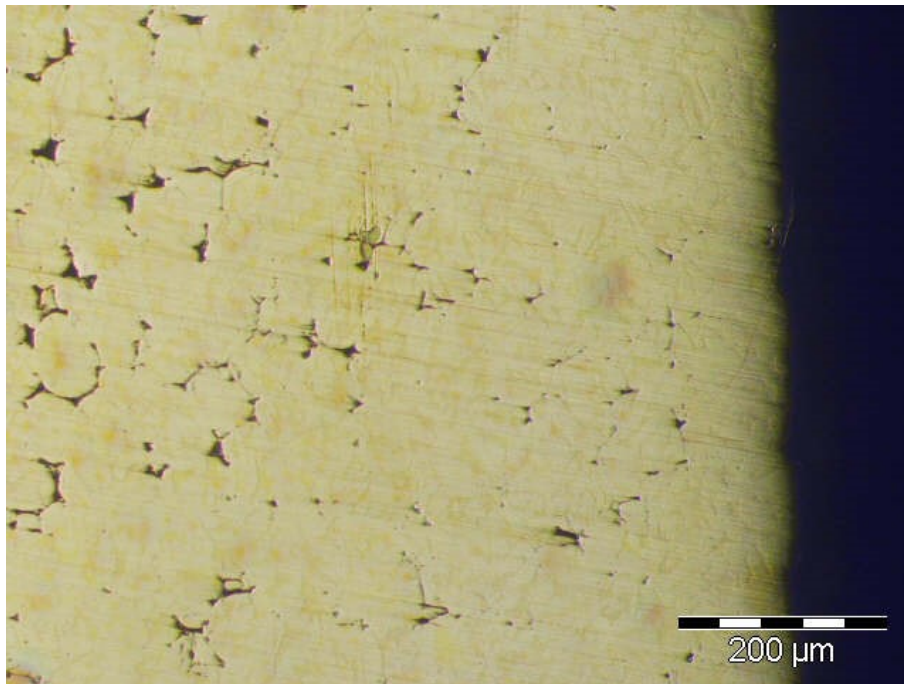


Figura A.19: Peça (C) ? - Com Fuga Grande - Dentro - 150×

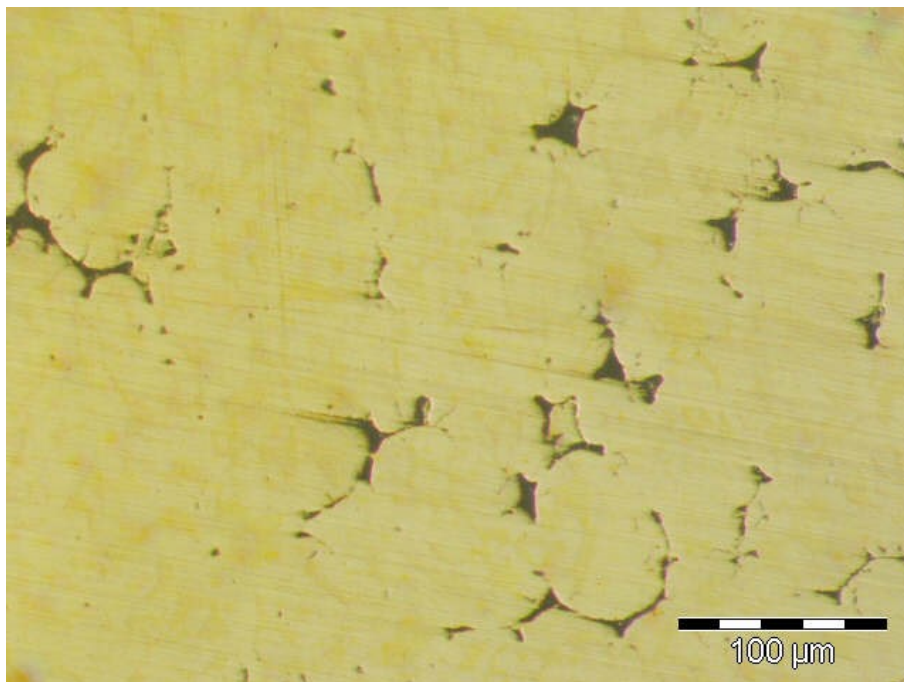


Figura A.20: Peça (C) ? - Com Fuga Grande - Dentro - 300×

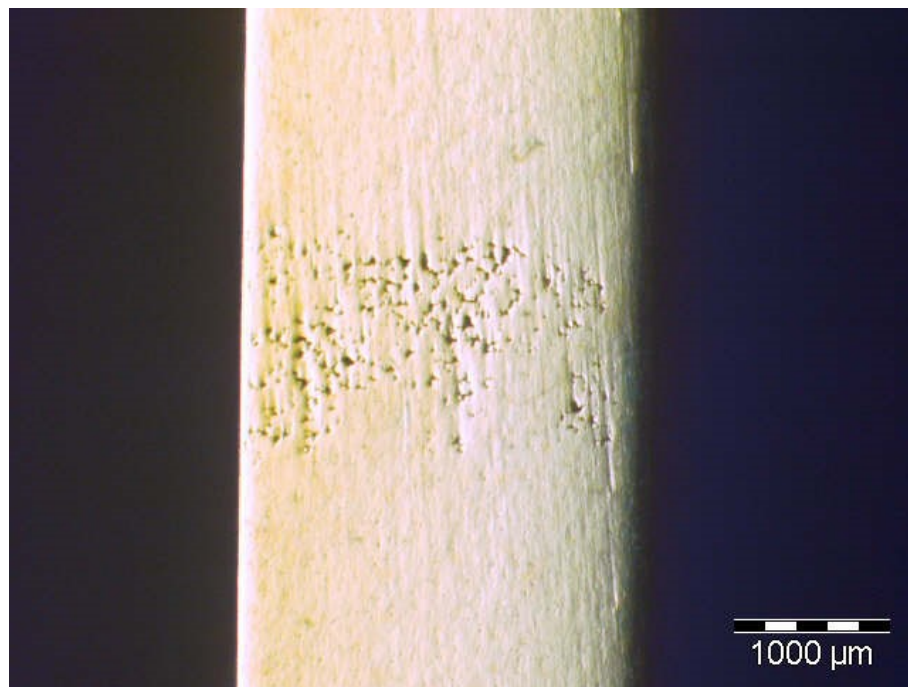


Figura A.21: Peça (D) - Com Fuga Pequena - 23×



Figura A.22: Peça (D) - Com Fuga Pequena - 75×

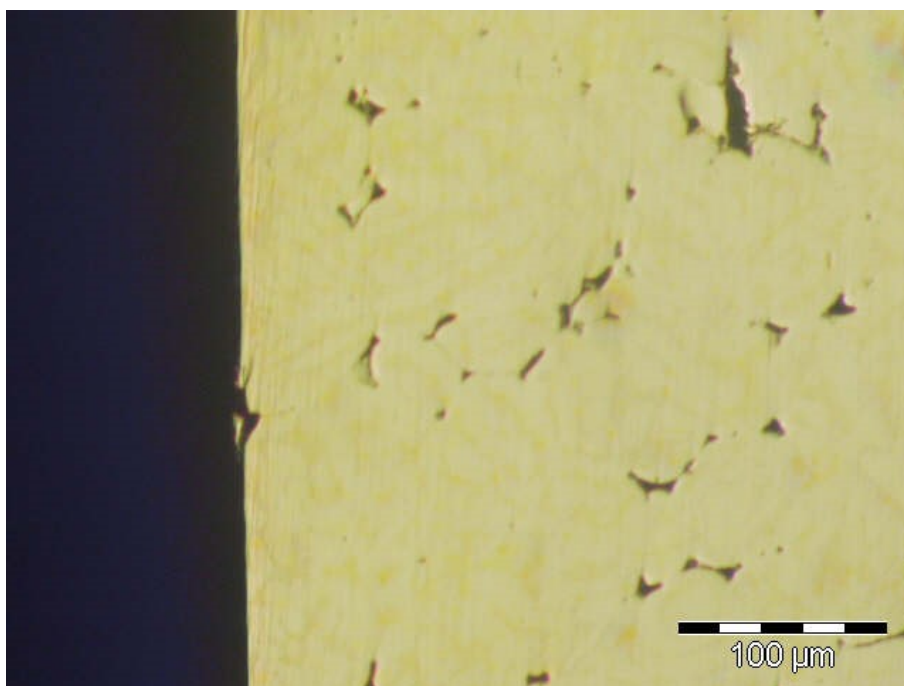


Figura A.23: Peça (D) - Com Fuga Pequena - 300×

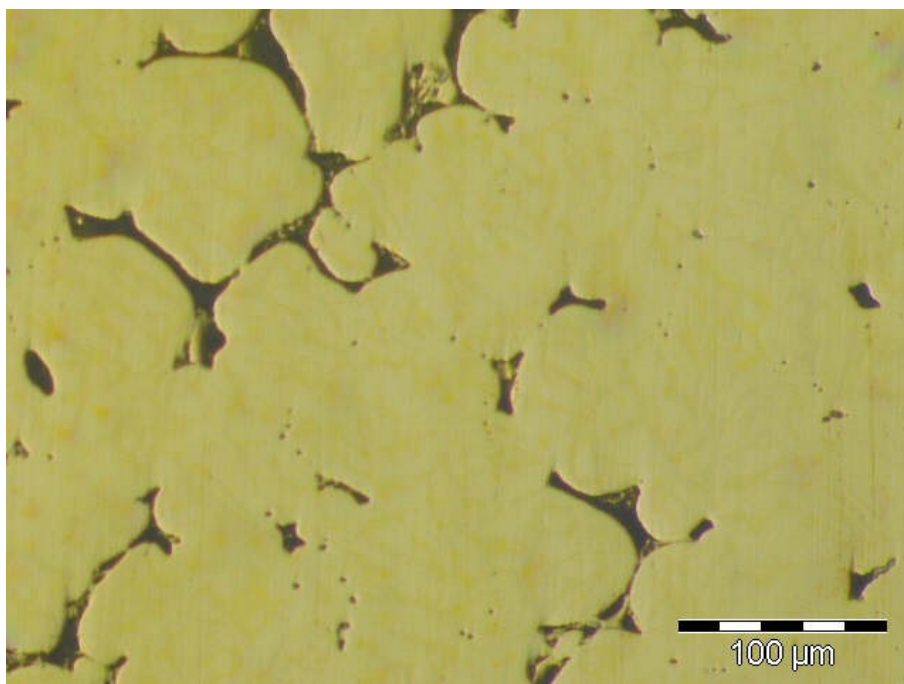


Figura A.24: Peça (D) - Com Fuga Pequena - 300×

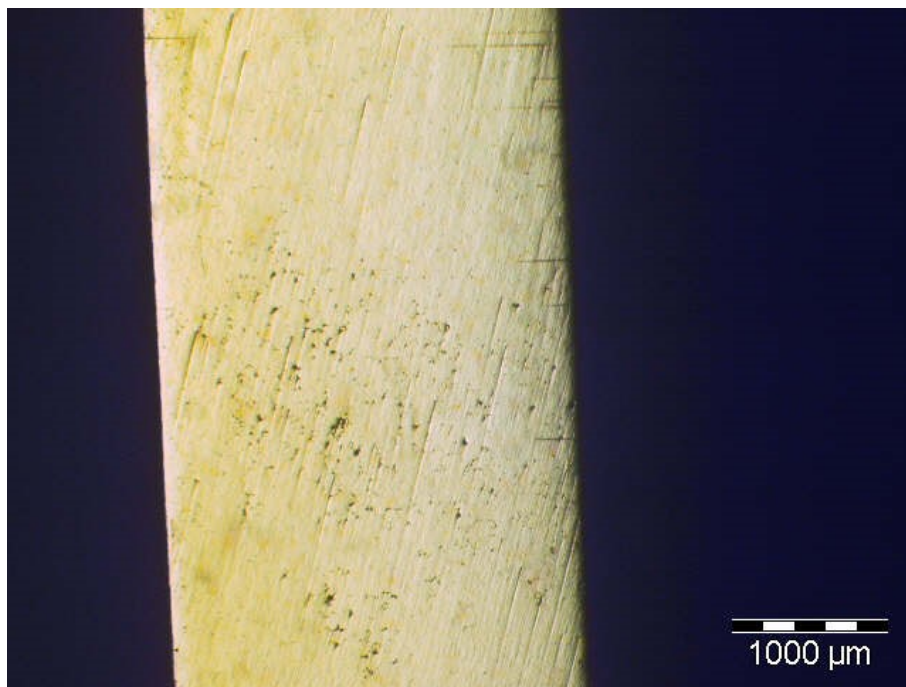


Figura A.25: Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 23×

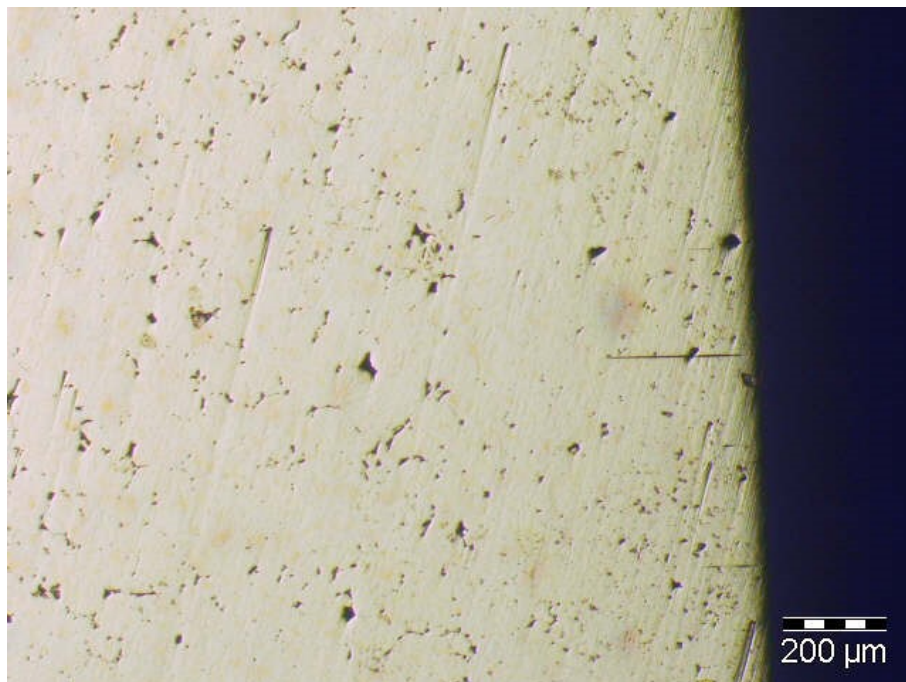


Figura A.26: Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 75×

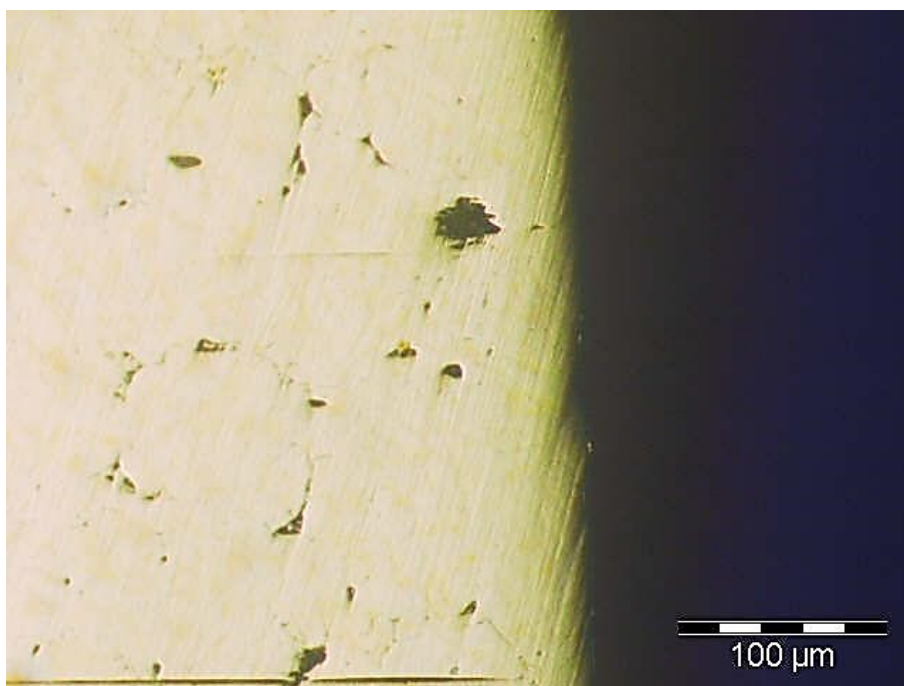


Figura A.27: Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 300×

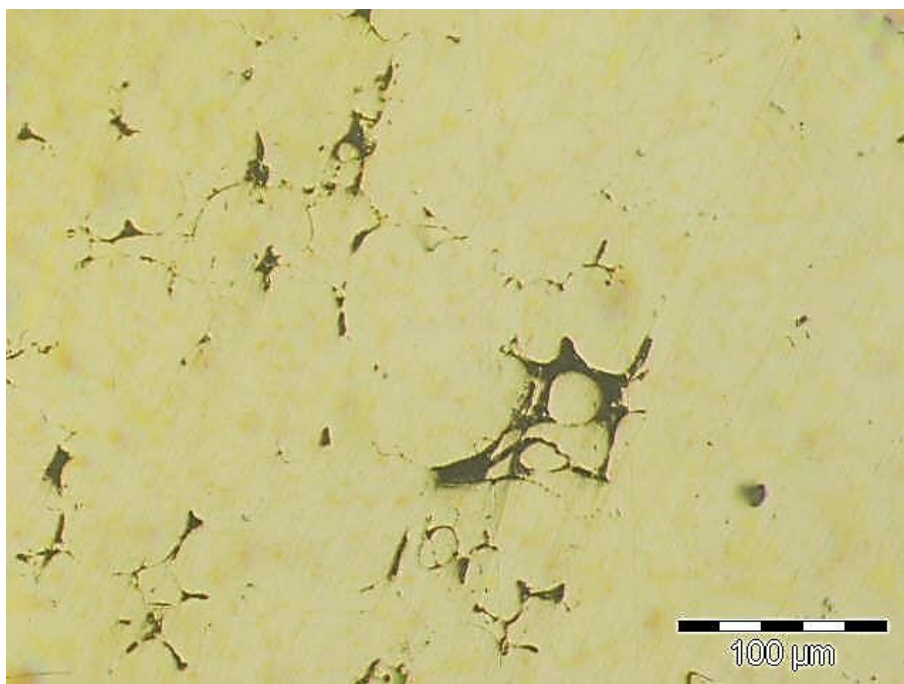


Figura A.28: Peça (D).1 - Com Fuga Pequena - 300×

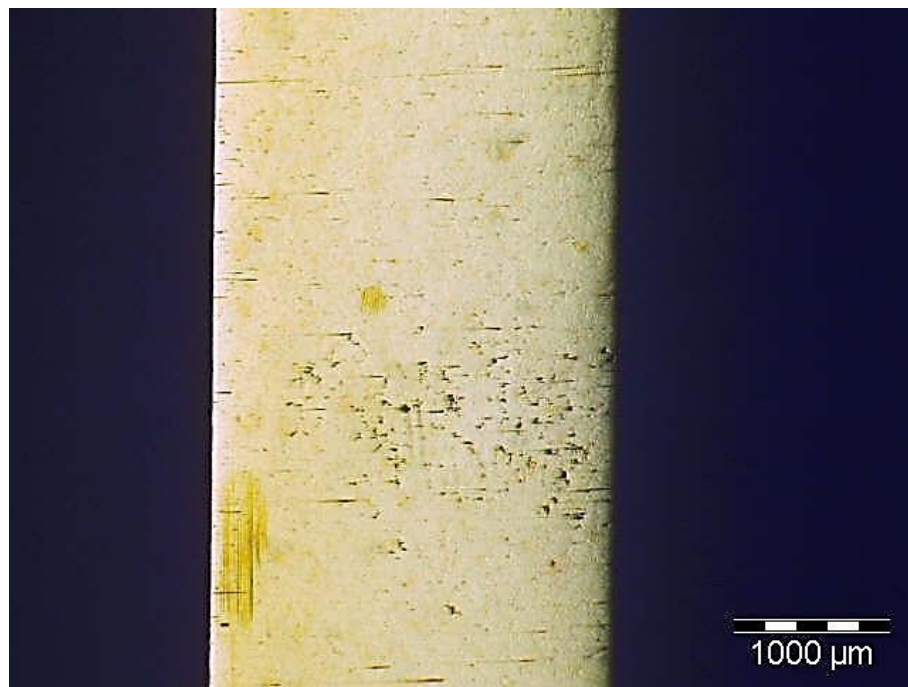


Figura A.29: Peça (E) - Com Fuga Pequena - 23×

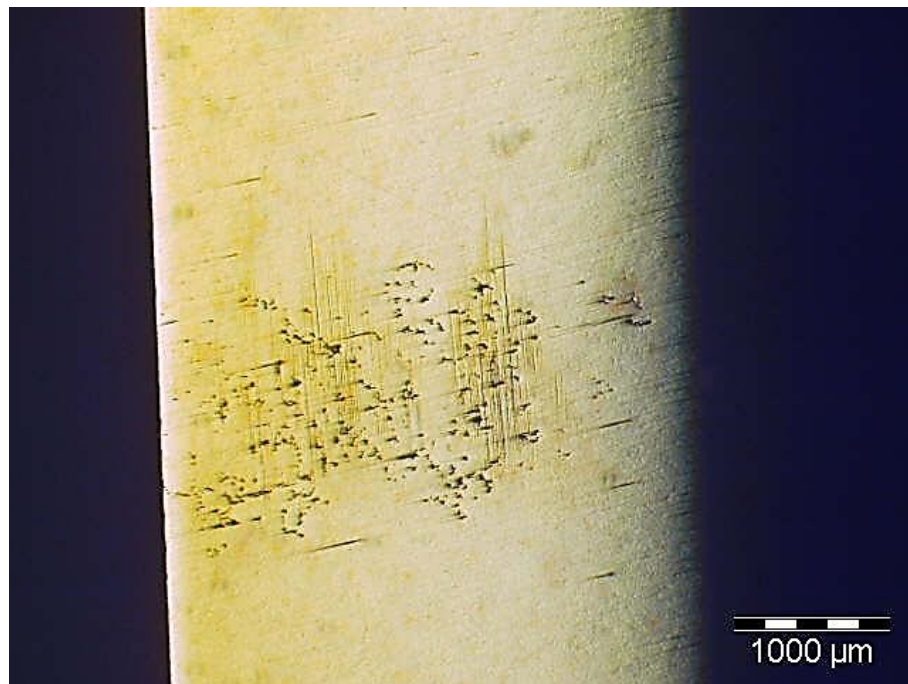


Figura A.30: Peça (E) - Com Fuga Pequena - 23×



Figura A.31: Peça (E) - Com Fuga Pequena - 75×

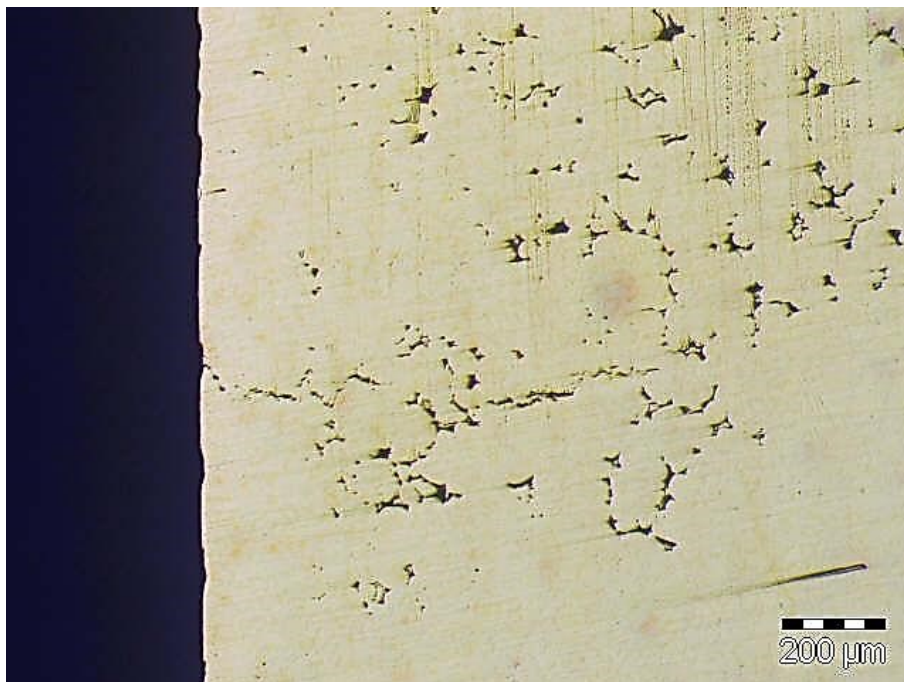


Figura A.32: Peça (E) - Com Fuga Pequena - 75×



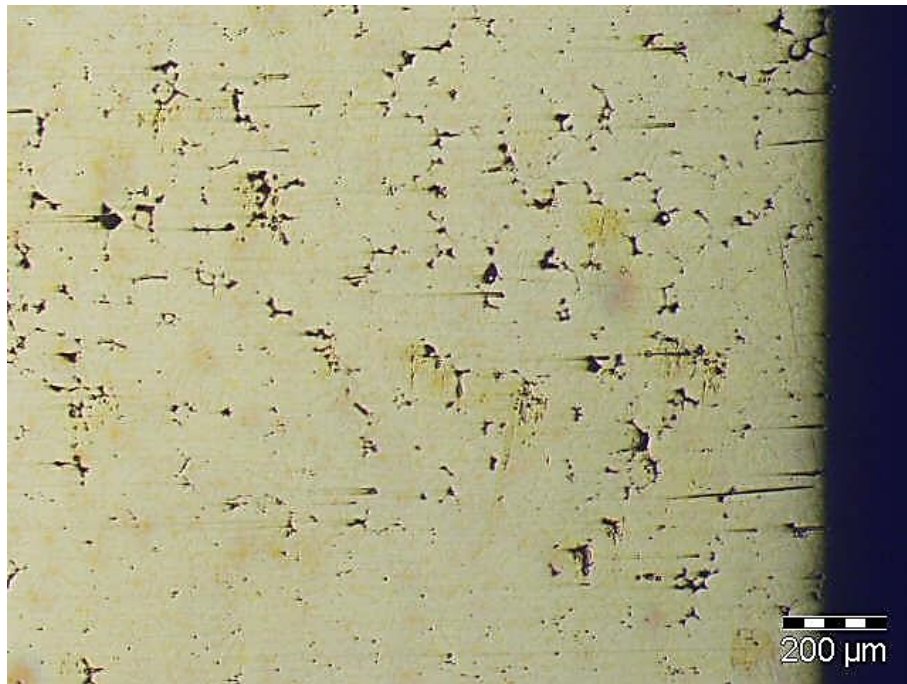


Figura A.33: Peça (E) - Com Fuga Pequena - 75×

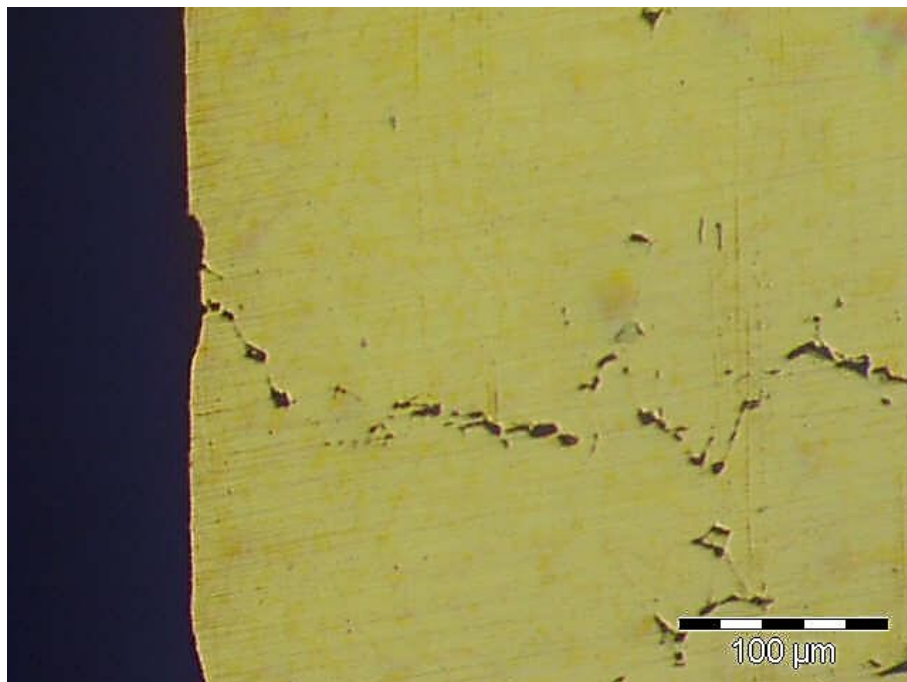


Figura A.34: Peça (E) - Com Fuga Pequena - 300×

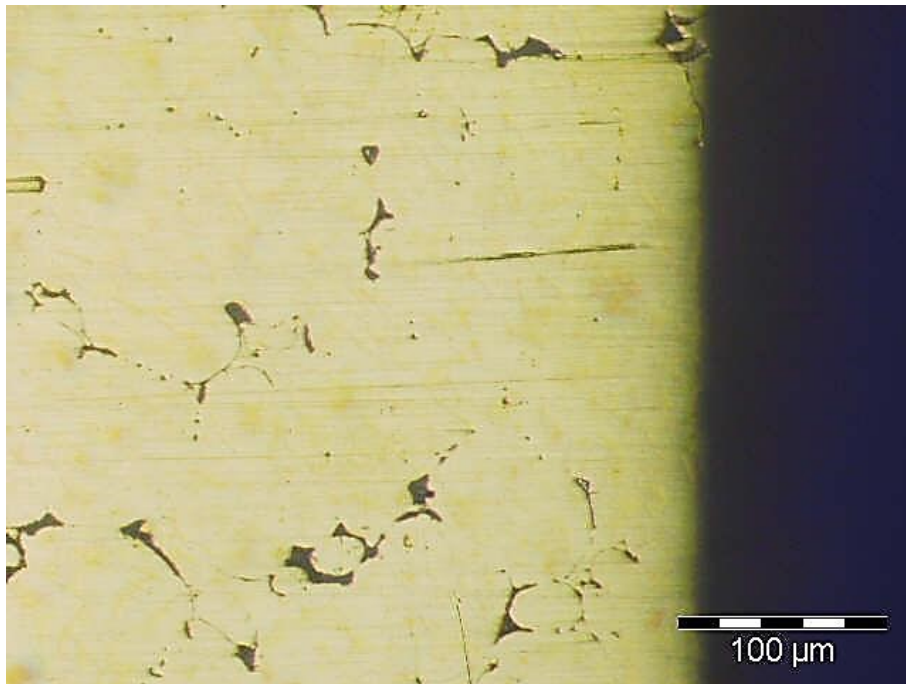


Figura A.35: Peça (E) - Com Fuga Pequena - 300×

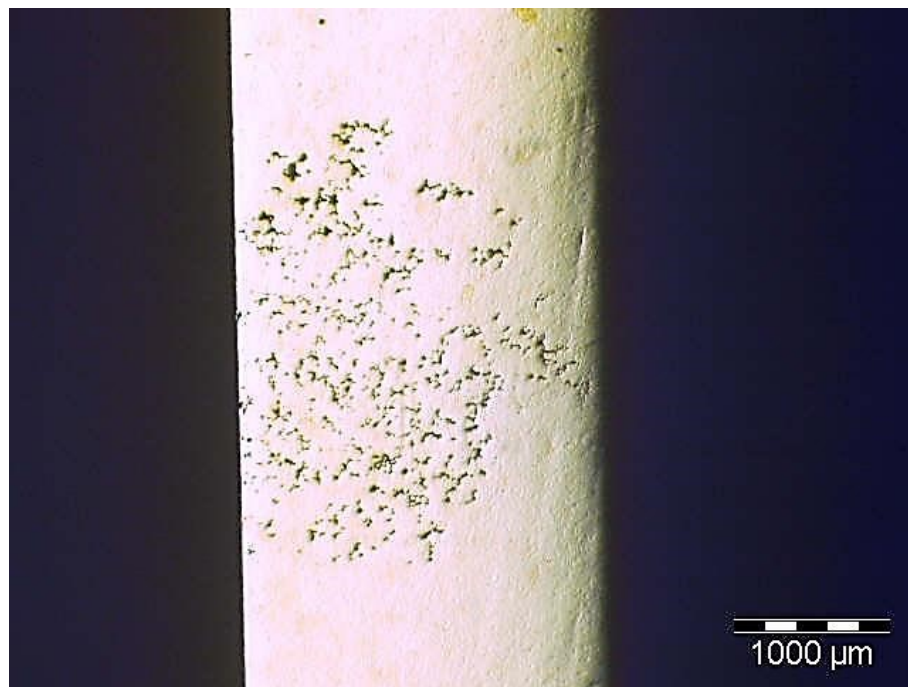


Figura A.36: Peça (E).1 - Com Fuga Pequena - 23×

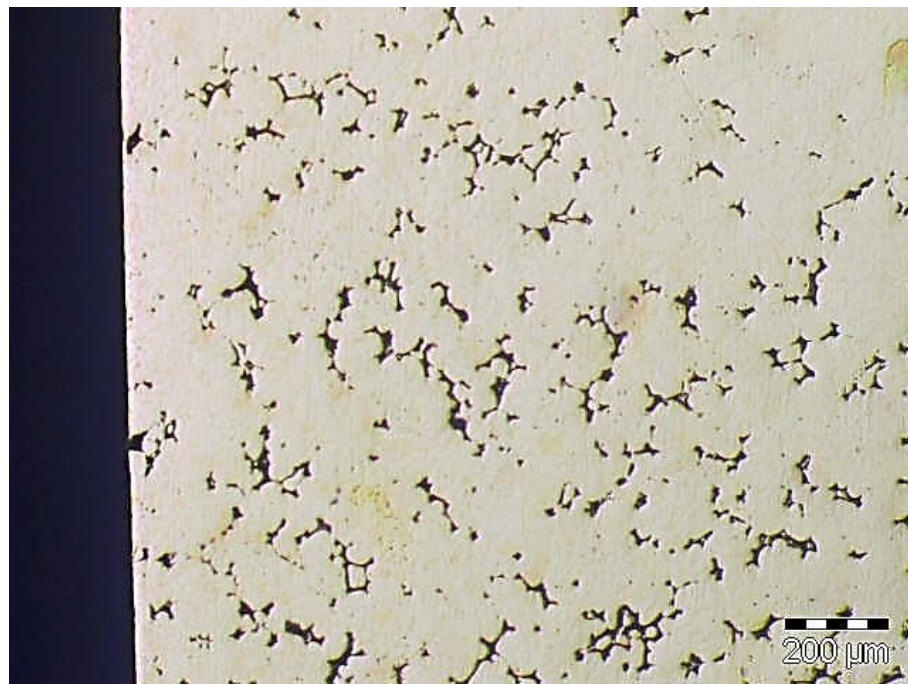


Figura A.37: Peça (E).1 - Com Fuga Pequena - 75×

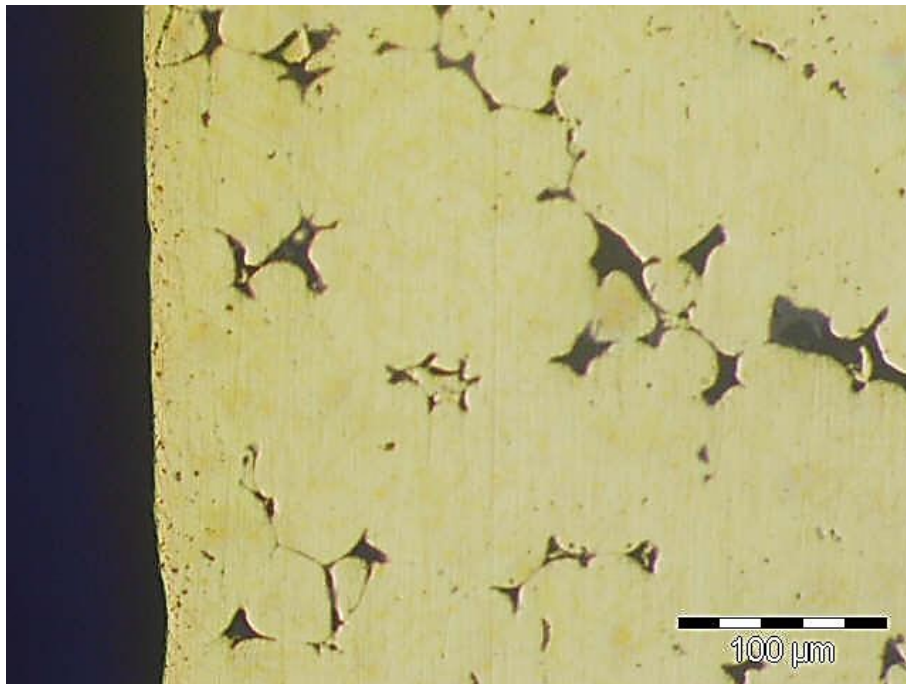


Figura A.38: Peça (E).1 - Com Fuga Pequena - 300×

## A.2 Comentários às fotografias

Efetuada uma análise atenta às figuras conclui-se que, quanto à peça (A), sem fugas:

- micro-rechupes pequenos, os maiores com  $40\mu m$  visíveis na Figura A.5;
- micro-rechupes mínimos (visíveis principalmente na Figura A.7, com cerca de  $4\mu m$ ;

Quanto à peça (B), sem fugas:

- micro-rechupes pequenos presentes na Figura A.9 (até  $40\mu m$  de extensão);
- micro-rechupes visíveis depois do ataque químico, de dimensões mínimas (Figuras A.10 e A.11, até  $4\mu m$ );

Quanto à peça (C), com fugas grandes:

- São visíveis na Figura A.13 as porosidades e fissuras resultantes dos micro-rechupes com a ampliação de apenas  $23\times$  (alguns com extensão até  $200\mu m$ ;
- À medida que se aumenta a ampliação e se procede ao ataque químico os micro-rechupes tornam-se mais visíveis e delineados (Figuras A.14, A.15, A.16);

Quanto à peça (C) ?, com fugas grandes: (não sei se esta será a mesma peça (C), não parece (apesar dos grandes defeitos serem concordantes com a peça (C) pois é a única que apresenta graves defeitos, isto se forem apenas as 5 peças consideradas))

- São visíveis na Figura A.18 as porosidades e fissuras resultantes dos micro-rechupes com a ampliação de apenas  $23\times$ ;
- À medida que se aumenta a ampliação os micro-rechupes tornam-se mais visíveis e delineados (Figuras A.19, A.20, atingindo até cerca de  $60\mu m$ );

Quanto à peça (D), com fugas pequenas:

- É visível na Figura A.21 um "corredor"(com mais de  $2000\mu m$ )de micro-rechupes que, quando ampliados se tornam evidentes (ver Figuras A.22 a A.24 (até  $100\mu m$ );

Parece-me que a peça (D).1 se refere à peça (D) mas a uma zona diferente que também apresenta defeitos (micro-rechupes - figuras A.25 a A.28, o maior de cerca de  $100\mu m$ ).

Quanto à peça (E), com fugas pequenas:

- Identificam-se logo à partida zonas com elevada densidade de micro-rechupes (Figuras A.29 e A.30) , mas todos eles de dimensões reduzidas (até  $200\mu m$  de extensão máxima mas extremamente finos)

### A.3 Relatório Apresentações PowerPoint - Simulações de Enchimento

Nesta parte irei analisar as apresentações PowerPoint disponibilizadas relativamente ao estudo do aparecimento de rechupes nas simulações de enchimento da torneira estudada.

#### A.3.1 Cifial - Relatório Simulação: Torneira ref. 7630476

Estuda-se o aparecimento de rechupes e das contrações na solidificação da torneira vazada, com o apoio do *software ProCast*. As condições iniciais são as apresentadas na tabela A.1.

Peça	Material	Temperatura (°C)
Coquilha	Cu-Be	170
Macho	Areia	120
Torneira	CuZn	995

Tabela A.1: Condições Iniciais - Torneira ref. 7630476

Pressão de Enchimento: 0,56 bar

Arrefecimento ao Ar

No vídeo apresentado é possível observar o processo de arrefecimento da torneira depois de completamente cheia: começa-se com a torneira a uma temperatura uniformemente quente (cerca dos 995°C impostos nas condições iniciais) e com o macho em areia entre os 85°C e os 150°C (presumivelmente aos 120°C de condição inicial). Ao longo de cerca de 20 segundos observa-se o arrefecimento da torneira toda até esta estabilizar entre os 215 e os 280°C (cor azul na simulação), sendo que as últimas zonas a arrefecer são as zonas onde irão ocorrer possíveis rechupes (empurrados para estas pelas primeiras zonas a solidificar). Estas zonas coincidem com as zonas onde foram encontrados defeitos na análise às peças fornecidas, confirmando os resultados preliminares. (slide 6 da apresentação)

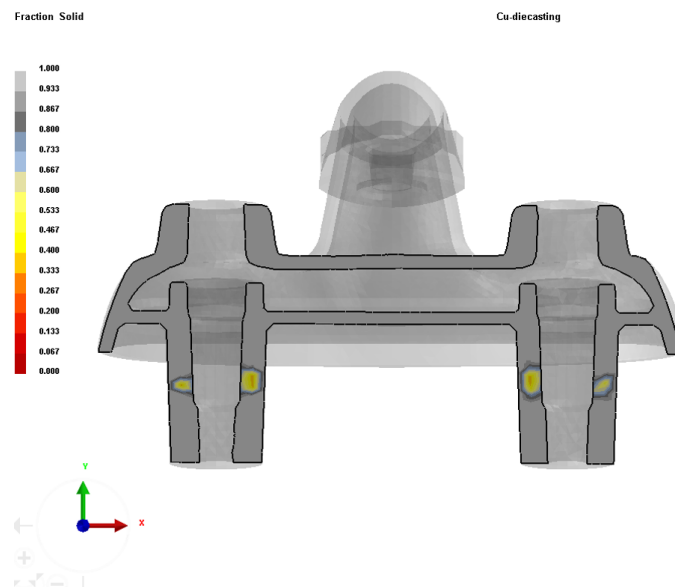


Figura A.39: Fração Sólida da Torneira - plano XY

Na figura A.39 é apresentada uma imagem de um corte no plano XY da zona posterior da torneira, onde as zonas a cinzento estão praticamente solidificadas e as zonas coloridas apresentam fase líquida. Como é possível observar, as zonas maciças inferiores apresentam metal líquido, o que pode originar o aparecimento de rechupes nestas secções.

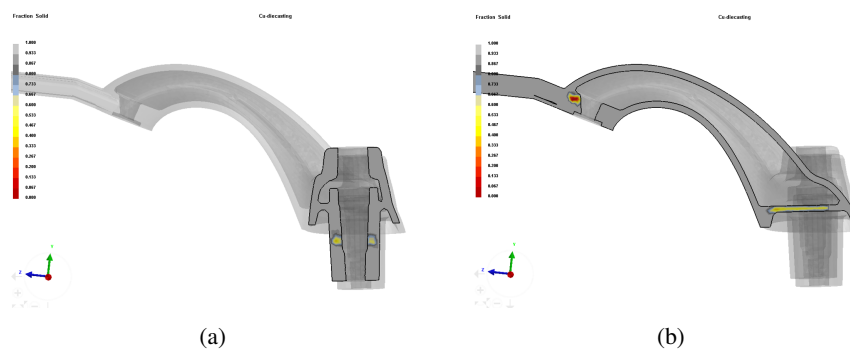


Figura A.40: Fração Sólida da torneira - plano YZ

Na figura A.53 apresentam-se duas vistas em corte no plano YZ em que, seguindo a notação da figura A.39, são visíveis zonas com metal líquido em que o aparecimento de rechupes é uma possibilidade. O aparecimento dos rechupes visíveis na figura A.40(b), na boca da torneira, não é tão crítico como os da figura A.40(a), pois esta é uma zona de baixa pressão em que quaisquer fugas não serão tão problemáticas como em zonas pressurizadas onde a estanqueidade é vital.

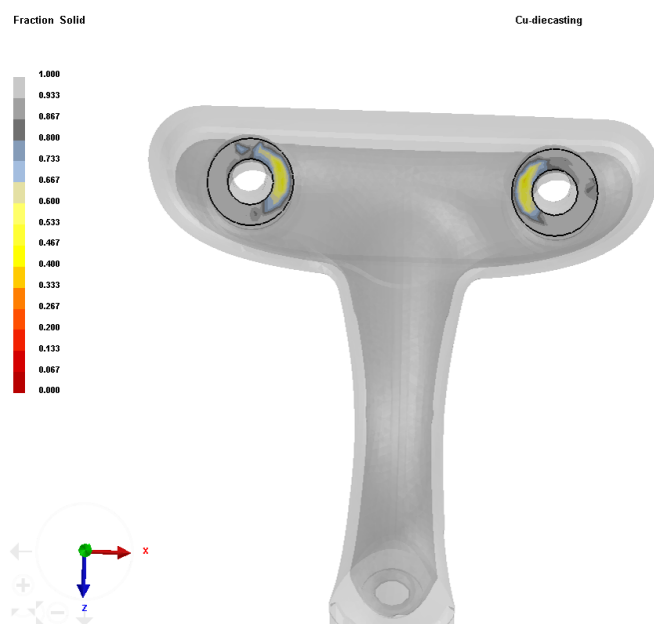


Figura A.41: Fração Sólida da Torneira - plano XZ

Na figura A.41, seguindo a mesma notação das figuras A.39 e A.53, são visíveis zonas de metal ainda líquido que poderão originar rechupes por contração em zonas importantes da peça. Na figura A.42 apresenta-se mais uma vista em corte de um plano paralelo a XZ em que as zonas de metal não solidificado correspondem na localização às falhas observadas nas peças reais.

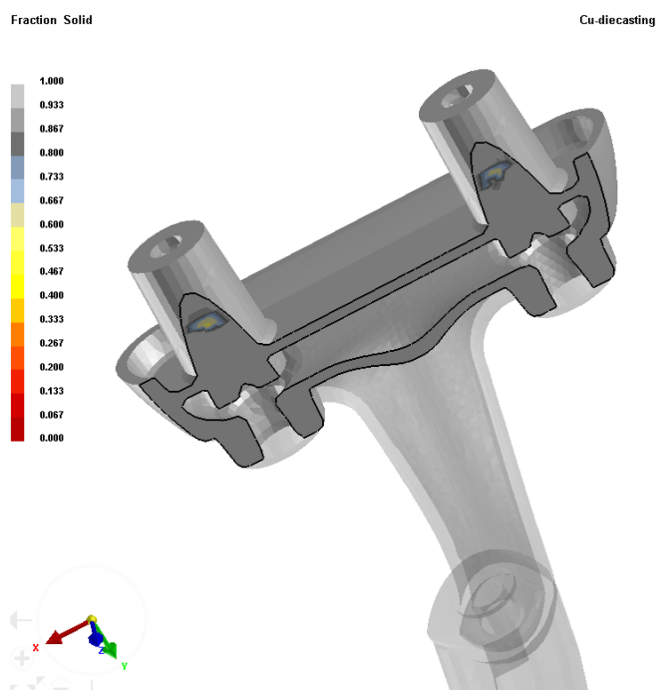


Figura A.42: Fração Sólida da Torneira - plano paralelo a XZ



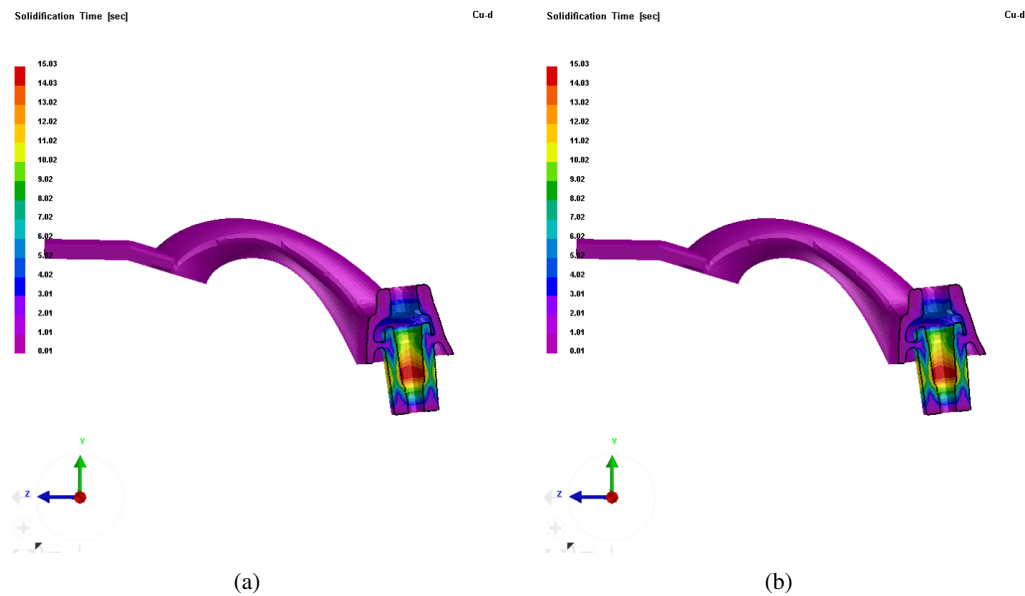


Figura A.43: Tempo de Solidificação - Planos YZ (a) e XY (b)

Na figura A.43 apresentam-se duas imagens relativas ao tempo de solidificação do metal líquido obtidas durante a simulação. As zonas a vermelho, laranja e amarelo são as zonas que solidificam em último lugar e onde, provavelmente, irá ocorrer a formação de rechupes.

A proposta de solução apresentada é a de inserir um "Alimentador na zona com forte probabilidade de surgimento de defeitos por contração", apresentada sumariamente na figura A.44.

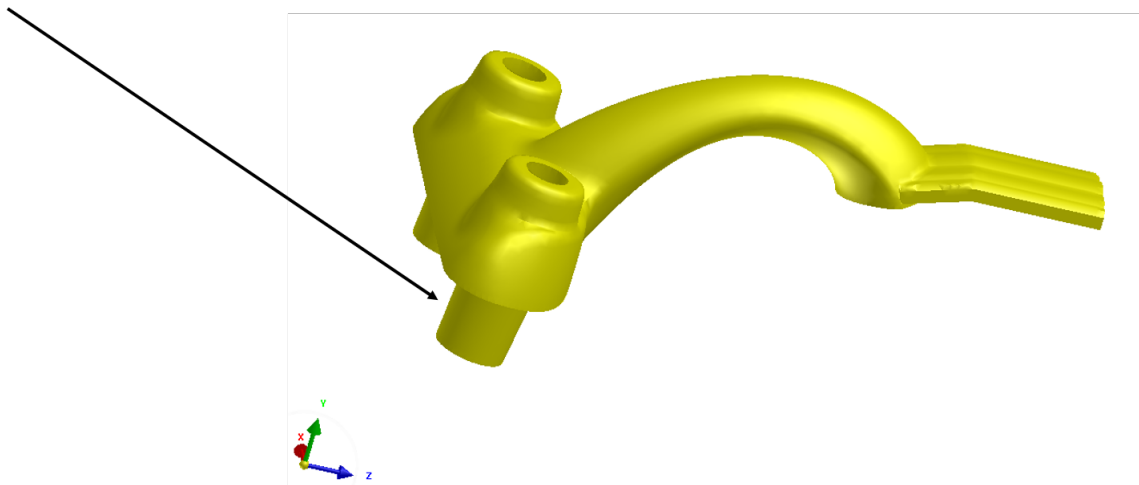


Figura A.44: Proposta de Solução

### A.3.2 Low pressure die casting of Tap - V2

Estuda-se o aparecimento de rechupes e das contrações na solidificação da torneira vazada em conjunto com os sistemas de gitagem e alimentação, com o apoio do *software ProCast*. As condições iniciais são as apresentadas na tabela A.2.

Peça	Material	Temperatura (°C)
Coquilha	Cu-Be	125
Macho	Areia - Silica	50
Torneira	CuZn	995

Tabela A.2: Condições Iniciais - Low pressure die casting of Tap - V2

Pressão de Enchimento: 0,56 bar

Arrefecimento ao Ar

No vídeo apresentado no *PowerPoint*, com os resultados da simulação no *ProCast*, utilizando a mesma notação que no caso da secção anterior, nota-se que as últimas zonas a solidificar são aquelas onde estaríamos à espera de observar o aparecimento de rechupes, coincidentes com as analisadas na secção anterior e com as observadas na realidade: os maciços de material e as zonas mais afastadas dos canais de alimentação.

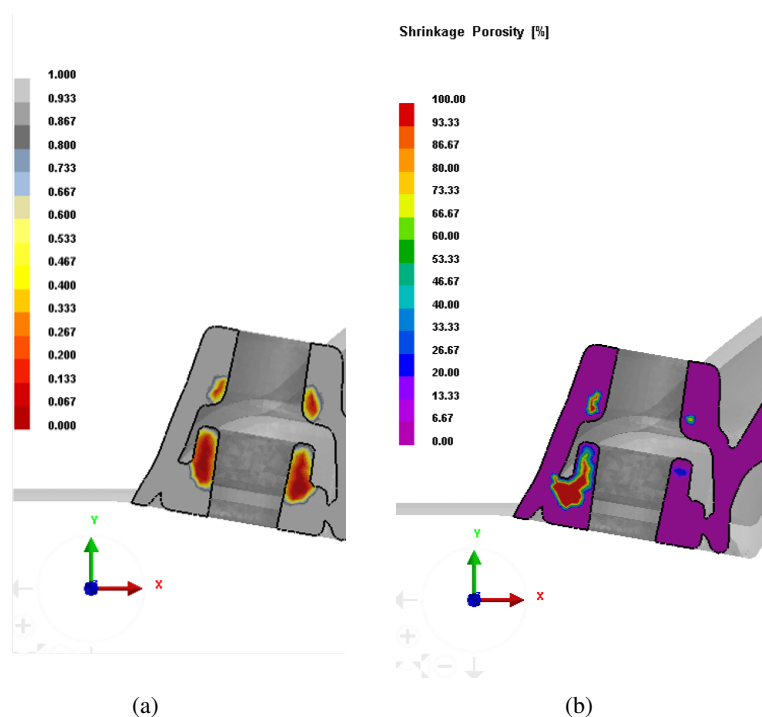


Figura A.45: Vista em corte no plano  $XY$  - Fração Sólida (a) e Porosidades na Contração (Rechupes) (b)

Analisando a figura A.45, observa-se que a zona apresentada é uma zona crítica na solidificação da peça e na qualidade desta: é uma das últimas zonas a solidificar (ver figura A.45(a)) e uma das zonas que apresenta mais rechupes quando sólida (ver figura A.45(b)). De facto, os rechupes propostos pela simulação observados na figura A.45(b) ocorrem na realidade e são observáveis numa das peças defeituosas fornecidas.

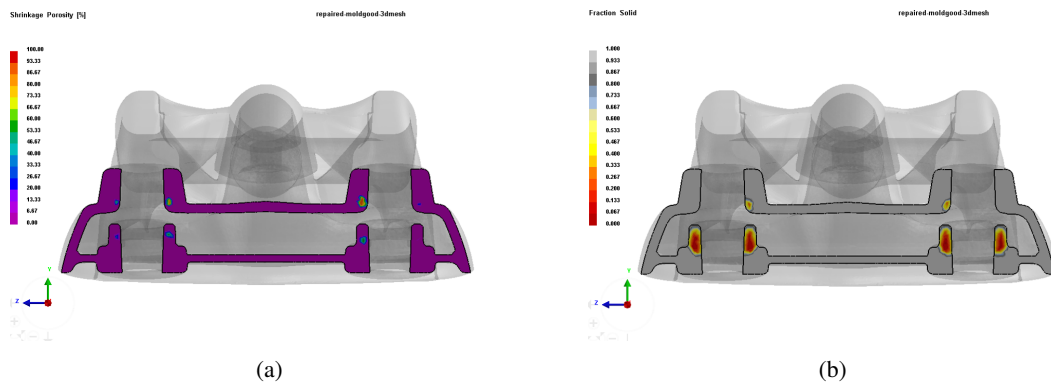


Figura A.46: Vista em corte no plano YZ - Porosidades na Contração (Rechupes) (a) e Fração Sólida (b)

Na figura A.46 são visíveis os defeitos na mesma secção mas em corte no plano YZ, onde é possível observar que nos cantos interiores (nas zonas de contacto com o macho em areia e não na coquilha), o metal solidifica em último lugar (ver figura A.46(b)) e dará origem a rechupes (ver figura A.46(a)).

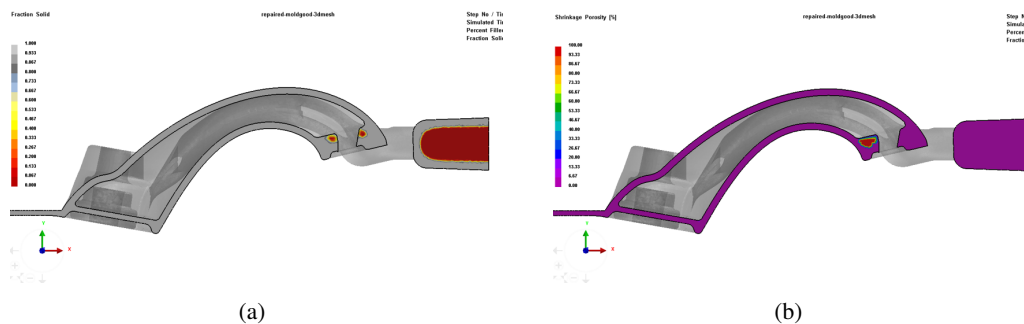


Figura A.47: Vista em corte no plano XY segundo o eixo da torneira - Fração Sólida (a) e Porosidades na Contração (Rechupes) (b)

Na figura A.47 é apresentada uma vista em corte no plano XY onde é possível ver que na boca da torneira poderá ocorrer o aparecimento de rechupes, dado que esta é uma zona que arrefece em último lugar (ver figura A.47(a)) e onde, teoricamente, ocorre um grande rechupe na zona em contacto com o macho interior (ver figura A.47(b)).

A análise ao tempo de solidificação e à formação de rechupes da boca da torneira e dos gitos subjacentes (apresentada na figura A.48) mostra que os gitos são maciços gigantes e que o tubo central tem uma zona inferior onde o metal solidifica em último lugar (figura A.48(b)), podendo dar origem a rechupes massivos (ver figura A.48(a)). A questão dos gitos serem apresentados como potenciais perigos na simulação não se verifica na realidade, pois mantendo a pressão constante durante o enchimento da coquilha e durante a solidificação da peça principal, é irrelevante a qualidade final dos gitos: até seria preferível "empurrar" os rechupes e defeitos todos para os gitos (pois estes são removidos posteriormente) se fosse possível garantir a qualidade da peça central.

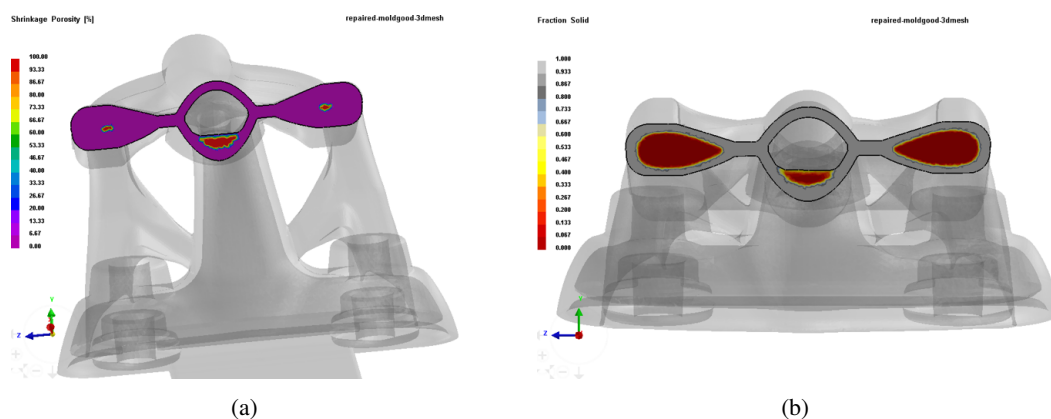


Figura A.48: Vista em corte no plano YZ junto aos alimentadores na boca da torneira - Porosidades na Contração (Rechupes) (a) e Fração Sólida (b)

A solução proposta é a de adicionar um alimentador na zona inferior da torneira para impedir a formação de rechupes nas zonas críticas. No entanto sugere-se que os alimentadores teriam de ser de muito fácil remoção para poupar tempo e prevenir qualquer introdução de defeitos na maquinaria.

### A.3.3 Add riser for the tap

Nesta apresentação foi ilustrada a solução proposta em ambos os casos anteriores: a introdução de um alimentador na zona crítica apresentada na figura A.45(a).

Para tal simularam-se dois cenários diferentes: num, figura A.49(a), introduziram-se dois alimentadores com um diâmetro de 18 mm e com um comprimento entre 5 e 10 mm; no outro, figura A.49(b), o diâmetro foi mantido em 18 mm mas o comprimento foi alterado para estar entre 15 e 20 mm. Em ambos os cenários efetuou-se um corte no macho de areia, figura A.49(c), e também se fizeram os furos correspondentes na coquilha, figura A.49(d).

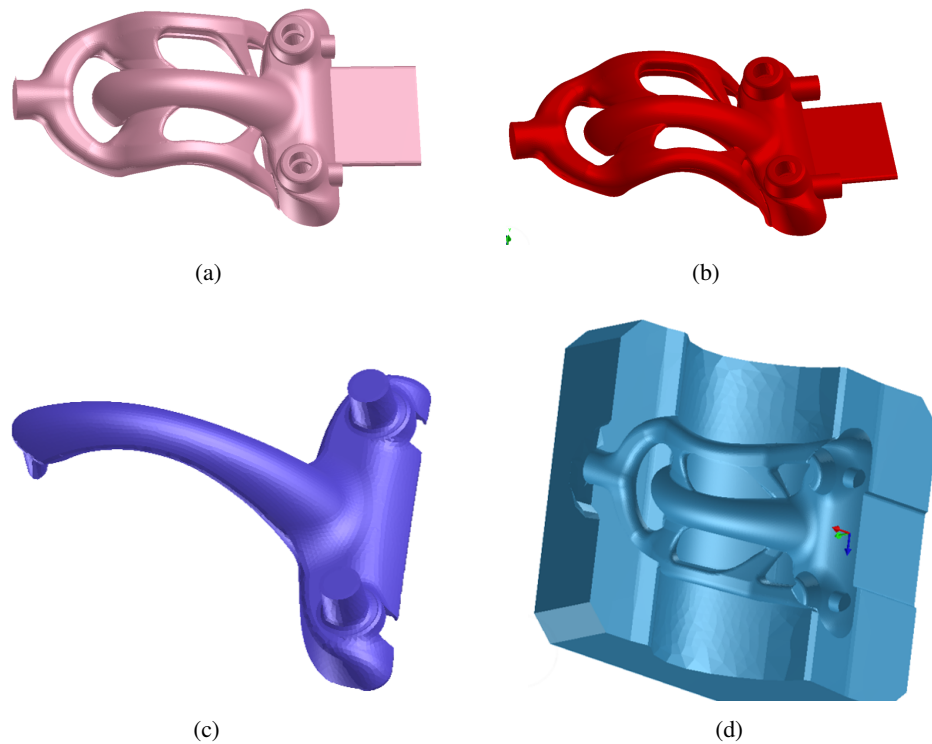


Figura A.49: Peças com geometria modificada

Na análise de enchimento verifica-se que os novos alimentadores são das últimas zonas a solidificar, como se esperava, em conjunto com a parte interior dos furos a abordar. Analisando depois os rechupes formados na torneira com alimentadores de 5 – 10 *mm*, figura A.50, observa-se que não foi possível "migrar" a zona afetada pelos rechupes para uma zona mais exterior, continuando esta situada na zona mais próxima do macho de areia.

Na análise de enchimento com alimentadores de 15 – 20 *mm*, a situação mantém-se, dando origem ao aparecimento de um rechupe enorme, como é possível observar na figura A.51.

Não foram apresentadas soluções alternativas para a resolução deste problema, sendo que a existência do rechupe na zona analisada terá, porventura, de ser abordada recorrendo a medidas mais drásticas, como a reconfiguração geométrica da coquilha e até da própria geometria interna da torneira.

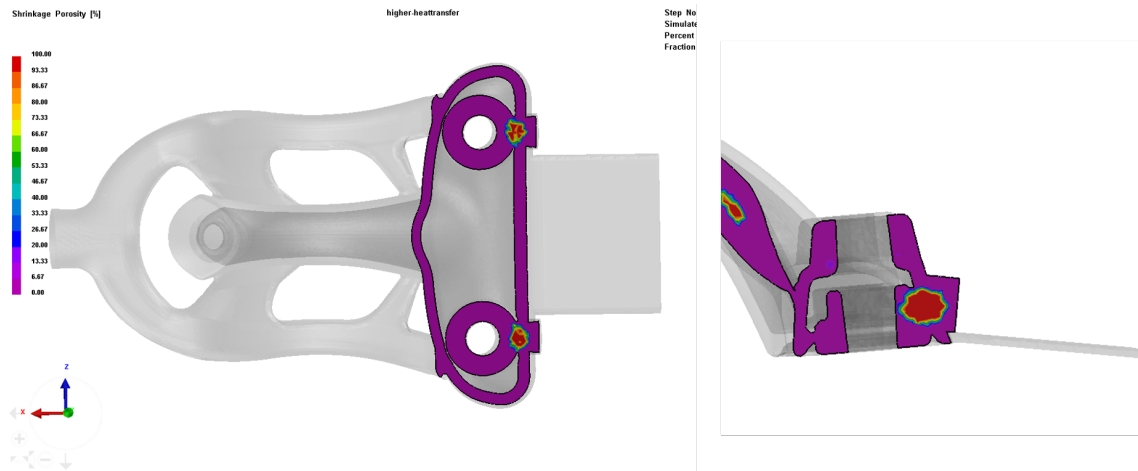


Figura A.50: Porosidades na Contração (Rechupes) na torneira com 5 – 10 mm

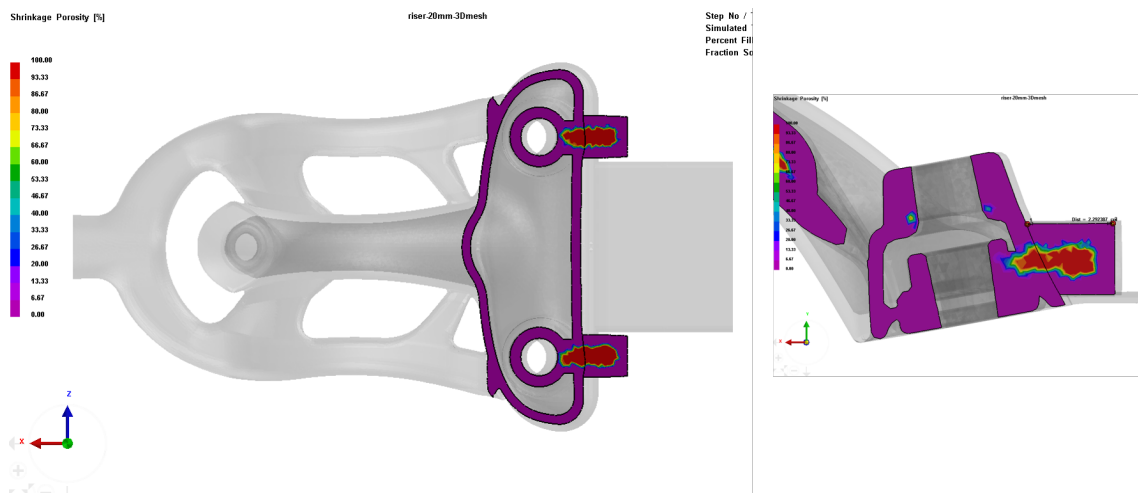


Figura A.51: Porosidades na Contração (Rechupes) na torneira com 15 – 20 mm

### A.3.4 Low pressure die casting of Tap - coating and riser using

Nesta apresentação é abordada a questão do revestimento da moldação: as condições de vazamento são as mesmas que na tabela A.2 e é utilizada uma camada de isolante com  $300 \mu m$  de espessura, conduzindo a um coeficiente de transferência de calor de  $1000 W/m^2K$ . Como é estudado por [D. R. Gunasegaram (2009)], a redução do coeficiente de transferência de calor (aumentando a camada de isolante/desmoldante) é um possível ponto de melhoria no que toca à prevenção da formação de rechupes.

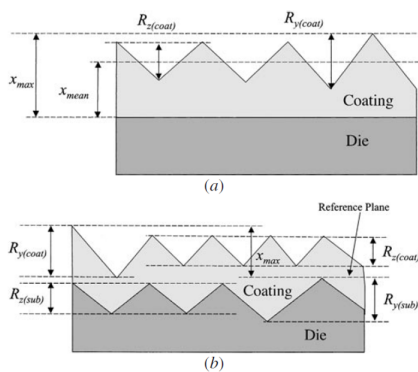


Fig. 2—The assumed coating-substrate configurations for (a) a white insulating die coating on a flat substrate and (b) a chromia coating on a roughened substrate.

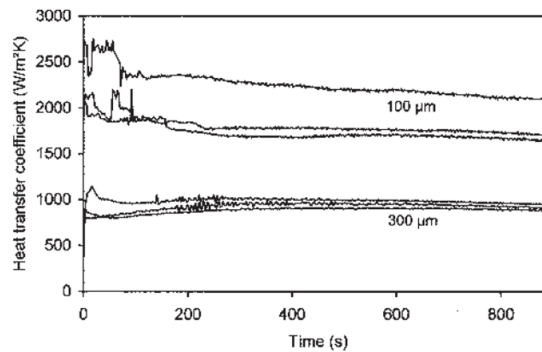


Fig. 7—Comparison of heat-transfer coefficients for AE413P alloy castings produced against an H13 die steel chill coated with 100- and 300- $\mu m$  thickness of an insulating white coating.

Figura A.52: Configuração aproximada do isolamento e relação entre espessura aplicada e Coeficiente de Transferência de Calor

Na figura A.53 é apresentada uma imagem da simulação de solidificação da torneira considerando o uso do revestimento proposto. Como é possível observar, ainda se verifica a formação de rechupes na área estudada.

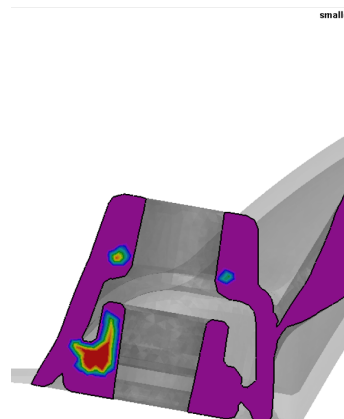


Figura A.53: Porosidades na Contração (Rechupes) considerando a utilização de uma camada de isolante de  $300 \mu m$

Continuam as tentativas de resolução deste problema na área superior da torneira (ver figura A.54).

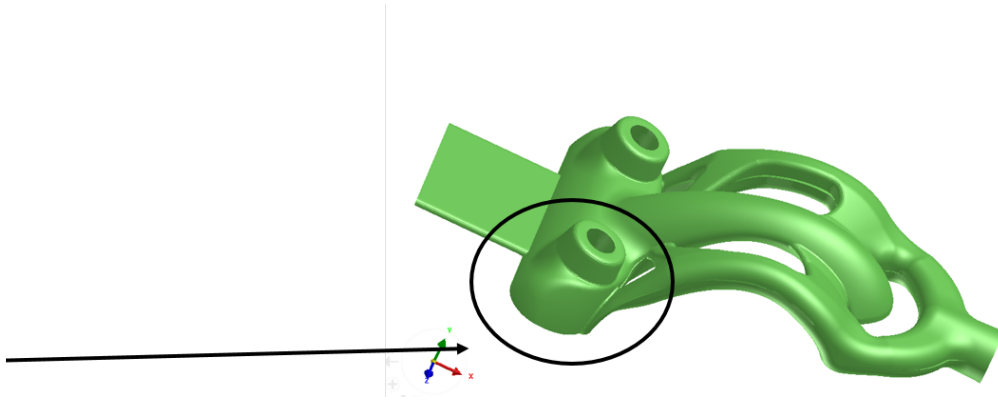


Figura A.54: Localização da área estudada

Numa tentativa de solucionar o problema, altera-se a estrutura do macho (figura A.55(b)) e adicionam-se alimentadores nas áreas afetadas pelos rechupes (figura A.55(a)), numa tentativa de criar *hot spots* de maior massividade junto à área afetada de modo a que os defeitos sejam "empurrados" na direção dos alimentadores (zonas mais quentes, logo são as últimas zonas a solidificar e, portanto, mais propensas à formação de rechupes).

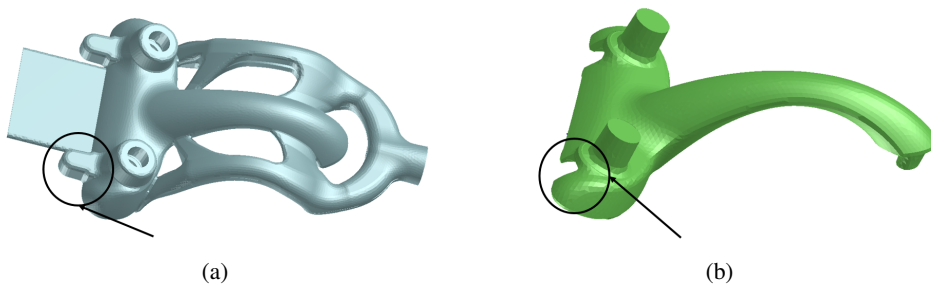


Figura A.55: Introdução de alimentadores (a) e alteração à geometria do macho (b)

Analisando os resultados da simulação, torna-se claro que a introdução dos alimentadores e correspondente alteração do macho não surtiram o efeito desejado: a existência de rechupes ainda se verifica (figura A.56).

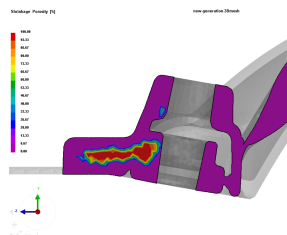


Figura A.56: Porosidades na Contração (Rechupes) considerando a modificação de geometria proposta



### A.3.5 Cifal-riser with sand core-V2

Nesta apresentação estuda-se a introdução de alimentadores na zona afetada por rechupes. O objetivo mantém-se comum com as apresentações anteriores: reduzir a formação de rechupes na área atualmente afetada. Investiga-se a hipótese de introduzir alimentadores nas áreas afetadas (estudada nas outras apresentações), mas desta vez tenta-se uma abordagem menos convencional: reveste-se o alimentador com um macho de areia. A introdução deste macho vai criar uma zona quente a toda a volta do alimentador, tentando assim que este seja efetivamente uma das últimas zonas a solidificar, "arrastando" para si os rechupes que se formariam na zona crítica. A figura A.57 ilustra a alteração à geometria e a geometria final proposta e simulada (figura A.58). A melhoria é evidente na nova geometria.

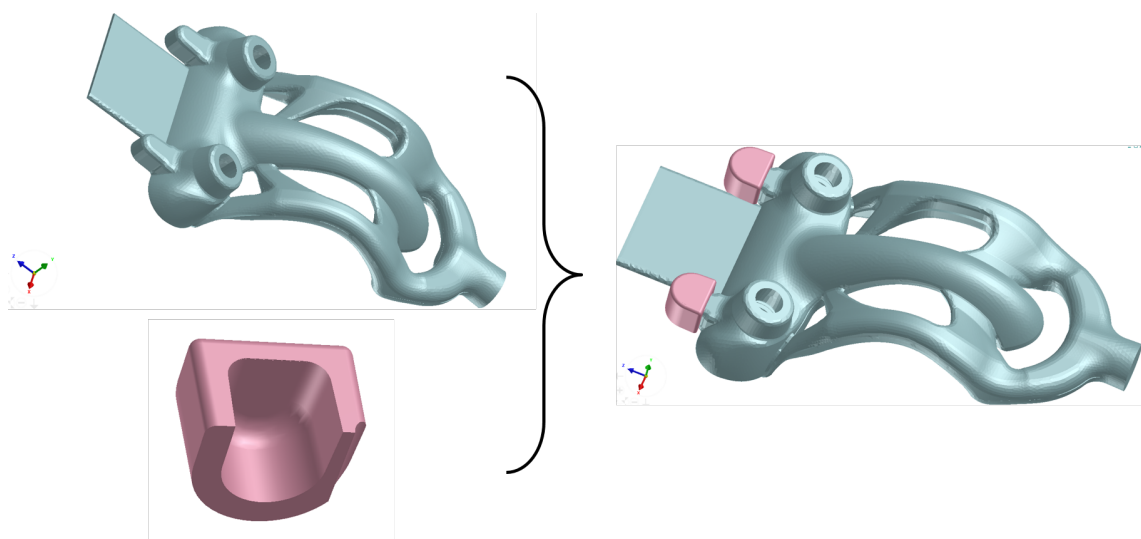


Figura A.57: Alteração à geometria da peça, com introdução de alimentadores e respectivos machos

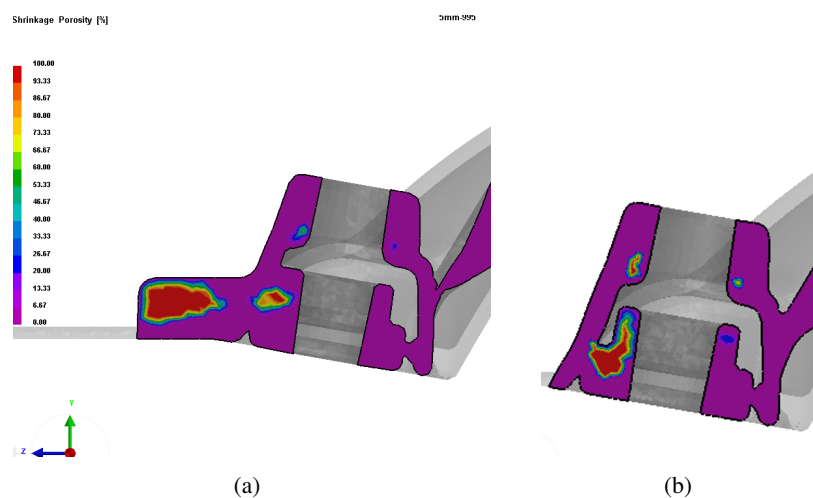


Figura A.58: Contrações na Solidificação (Rechupes) com o sistema alimentador+macho (a) e sem qualquer gito localizado (b)

A literatura disponível e experiência empírica são consensuais no que toca à temperatura de vazamento e sua associação à formação de rechupes, no processo de fundição por baixa pressão: uma temperatura de vazamento inferior, mais perto do limite da temperatura de *liquidus* irá acarretar menos rechupes (ou pelo menos uma menor probabilidade de formação destes).

O material considerado para as simulações é uma liga de latão comum, *Cu60Zn40* que apresenta temperatura de *liquidus* de 905°C e temperatura de *solidus* de 899°C (as propriedades da liga estão apresentadas detalhadamente na tabela A.4). Alterando a temperatura de vazamento de 995°C para 955°C, obtemos os seguintes parâmetros de vazamento:

Peça	Material	Temperatura (°C)
Coquilha	Cu-Be	125
Macho	Areia	50
Torneira	CuZn	955

Tabela A.3: Novas condições de vazamento

Os resultados das simulações são apresentados na figura A.59.

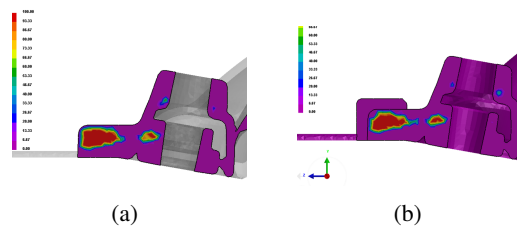


Figura A.59: Contrações na Solidificação (Rechupes) para Temperaturas de vazamento de 995°C (a) e 955°C (b)

	%
Cu	62,0
Pb	<0,01
Sn	0,02
Ni	0,01
Fe	0,07
Mn	<0,01
Si	0,01
Al	0,67
Bi	0,66
As	0,02
SbO	0,01
Zn	...

Tabela A.4: Liga utilizada

### A.3.6 Cifal-riser with sand core-V3

Na apresentação continuou-se o processo de melhoria do alimentador introduzido com macho em areia; utiliza-se um *Insulation Riser* (presumo que seja um *riser* aquecido para promover a formação de rechupes em si, afastando-os da peça)(figura A.60). Os resultados foram satisfatórios, e o tempo de solidificação aumentou 1 segundo (de 19 segundos para 20 segundos).

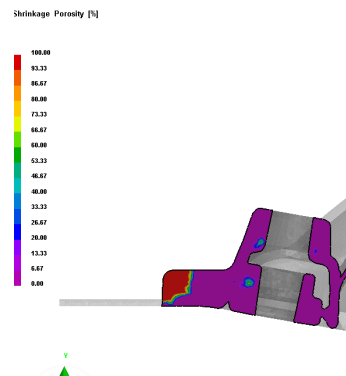


Figura A.60: Formação de rechupes com o uso do *Insulation Riser*

Criando um novo alimentador, com uma área inferior (em vez de  $930 \text{ mm}^2$  utilizam-se  $917 \text{ mm}^2$ )(figura A.61(a)), e com um novo macho de areia (figura A.61(b)) procedeu-se à simulação (figura A.62).

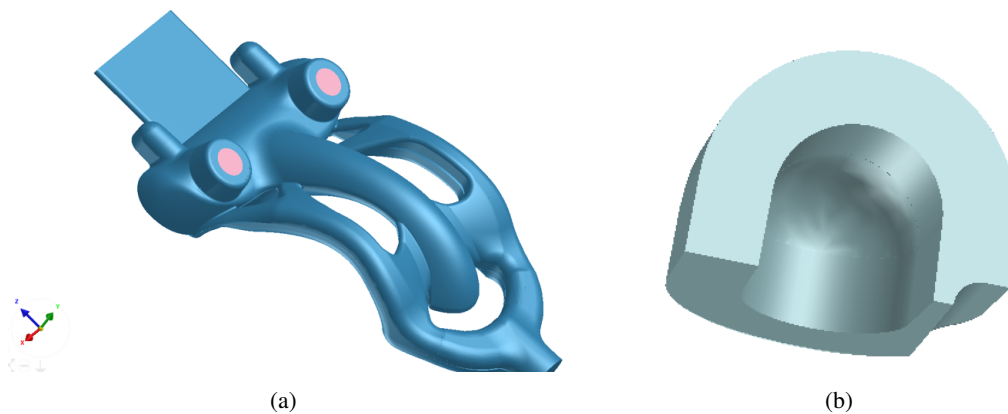


Figura A.61: Nova geometria da torneira com gito (a) e macho de areia para revestimento (b)

Como se vê, a formação de rechupes com este novo alimentador é muito pior do que no caso do alimentador anterior; conclui-se portanto que esta mudança de geometria não é favorável.

Analisou-se depois uma possível mudança na liga utilizada, estudando a simulação da mesma peça (simples, sem quaisquer dos novos gitos adicionados) para a utilização de uma nova liga:  $\text{Cu70Zn30}$ . Os resultados da simulação estão presentes na figura A.63(a), comparados com os resultados da primeira simulação (com a liga  $\text{Cu60Zn40}$  - figura A.63(b)).

Como se vê, a mudança de liga promoveria a formação de menos rechupes (ou, pelo menos, menos pronunciados). No entanto, estes continuam a aparecer na zona crítica da peça. Talvez

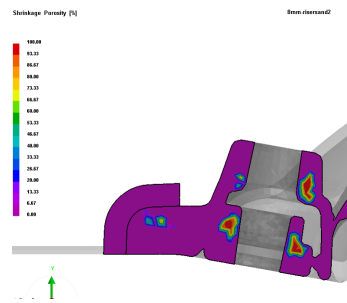


Figura A.62: Formação de rechupes com o novo gito e respetivo macho

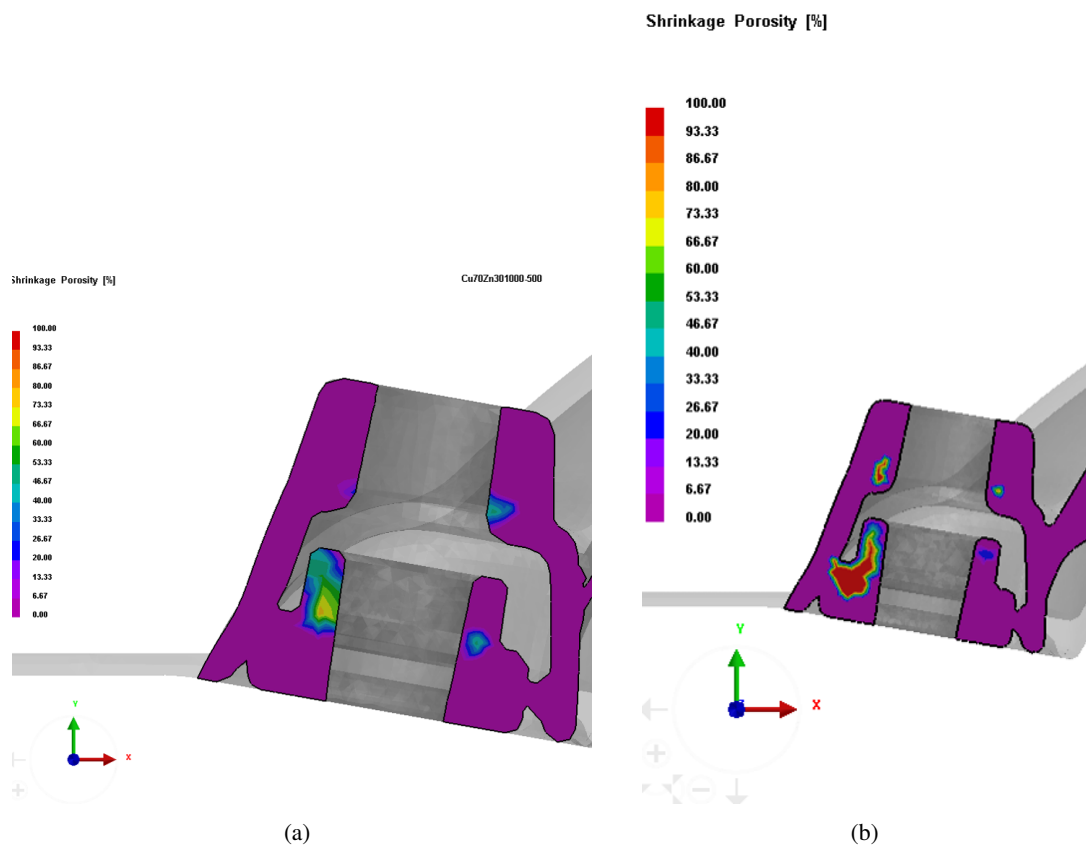


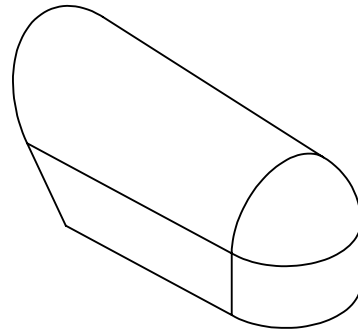
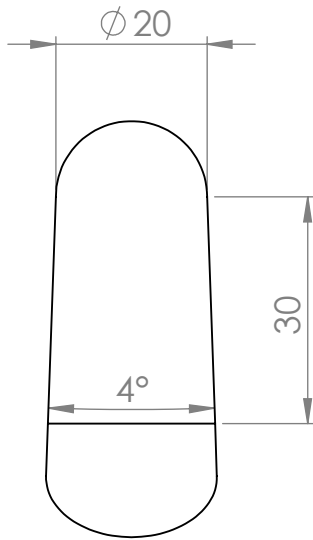
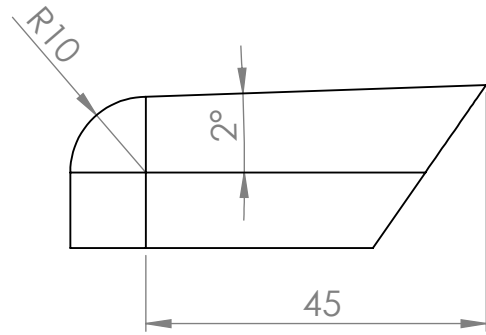
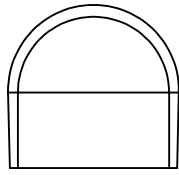
Figura A.63: Formação de Rechupes - Possível Mudança de Liga

recriando as propostas de novos alimentadores apresentadas acima para a utilização desta nova liga se consigam atingir resultados mais satisfatórios.

## **Anexo B**

# **Desenho de Definição - Alimentador**

Apresenta-se na página seguinte um desenho de definição do alimentador utilizado, com geometria simplificada.



$$V = 16978.73 \text{ mm}^3$$

$$A = 3505.93 \text{ mm}^2$$

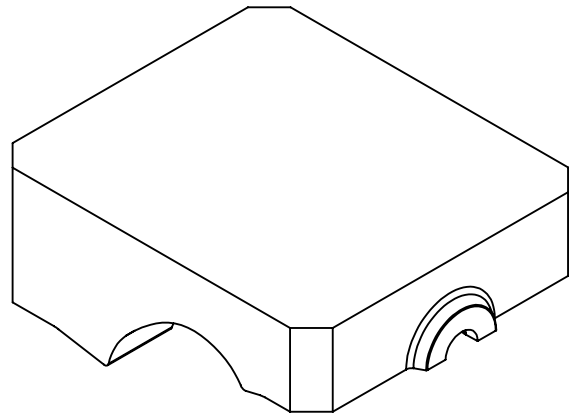
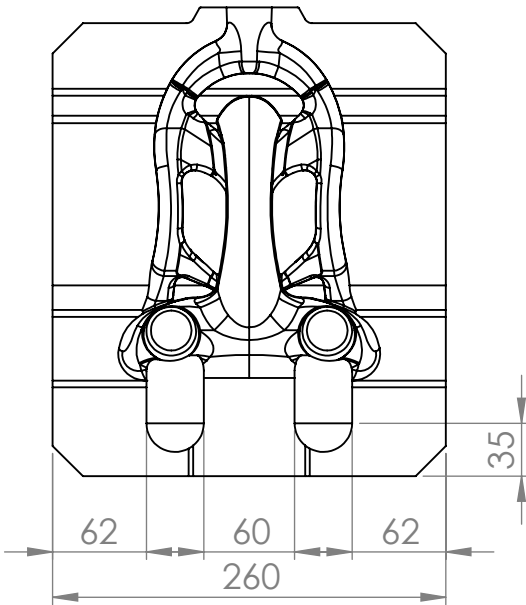
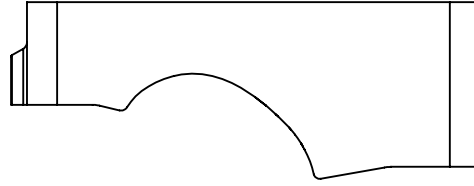
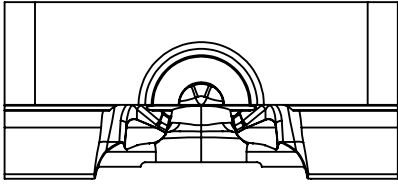
$$M = \frac{V}{A} = 4.84 \text{ mm}$$

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN			SIGNATURE		DATE		TITLE: <b>Alimentador (com geometria simplificada)</b>				
CHK'D					1-6-14						
APPV'D											
MFG											
Q.A					MATERIAL:		DWG NO.		<b>alimentador</b>		
					WEIGHT:		SCALE:1:1		A4		
							SHEET 1 OF 1				

## **Anexo C**

# **Desenho de Definição - Coquilha Superior**

Apresenta-se na página seguinte um desenho de definição da coquilha superior.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	PMelo		1-6-14		
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				CuBe - CIFIAL	
				WEIGHT:	

TITLE:  
Coquilha com Cavidades para os machos

DWG NO. coquiha\_2cavidade

A4

SCALE:1:5

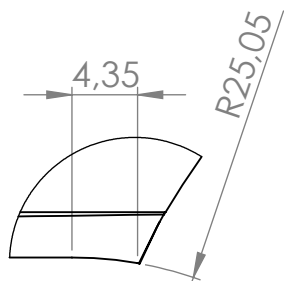
SHEET 1 OF 1



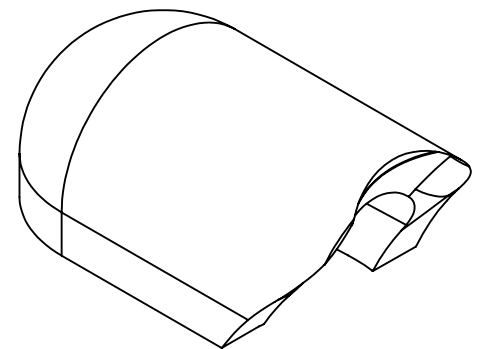
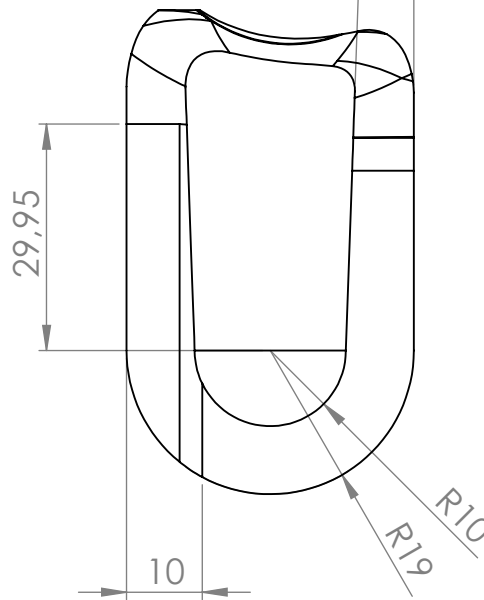
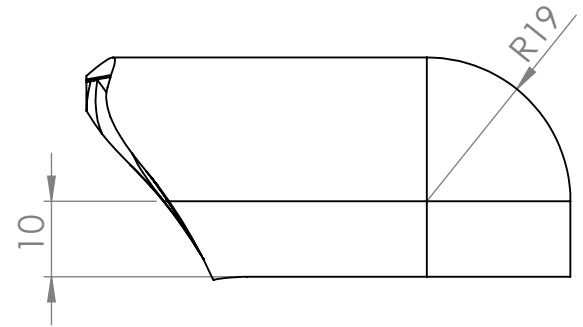
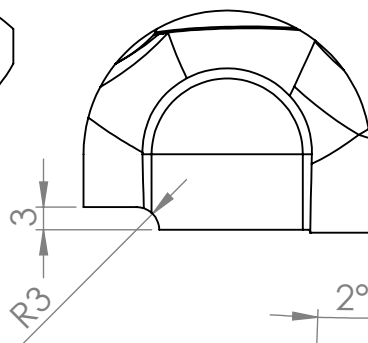
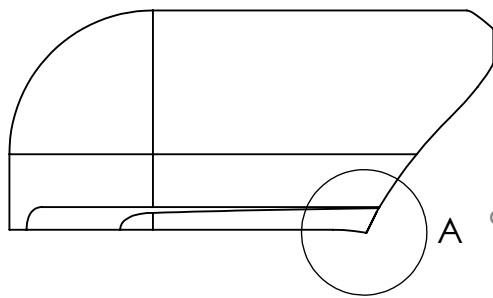
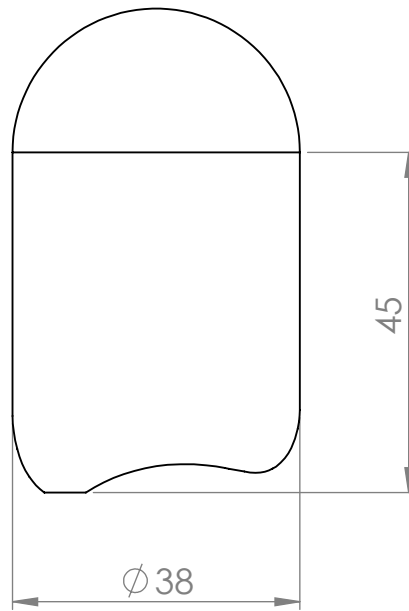
## **Anexo D**

# **Desenho de Definição - Macho de Areia Esquerdo**

Apresenta-se na página seguinte um desenho de definição do macho exterior de areia, do lado esquerdo.



DETAIL A  
SCALE 2 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	PMelo		1-6-14
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

MATERIAL:  
Areia de Silica

TITLE:

Macho (Esquerdo) -  
Versão 2

DWG NO.

macho\_cavidade\_final

A4

WEIGHT:

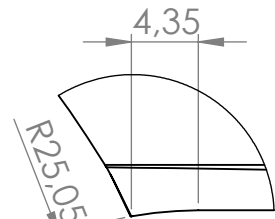
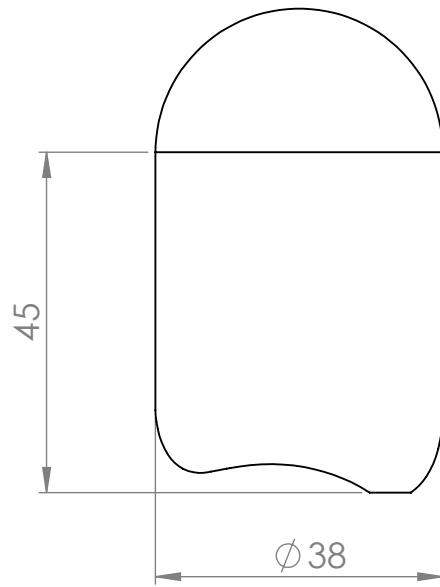
SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

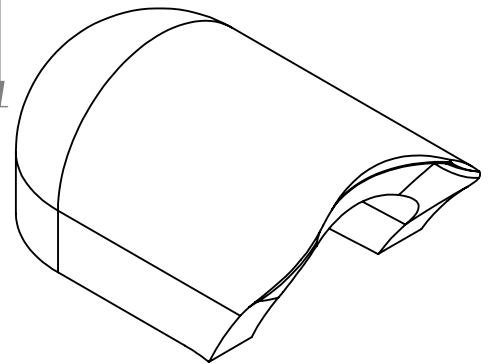
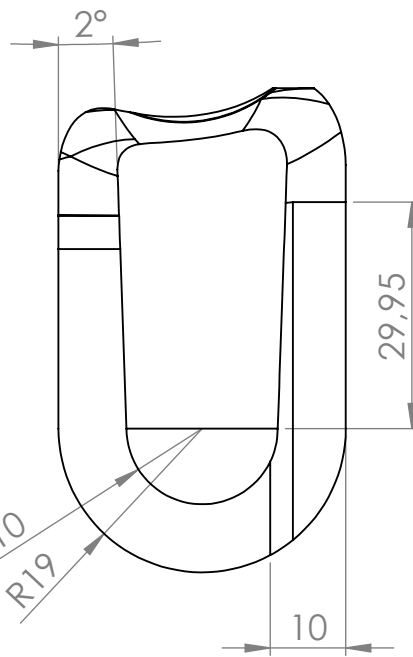
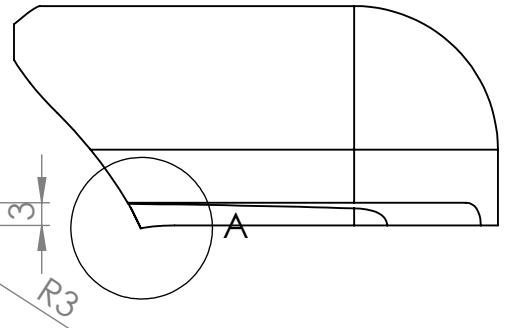
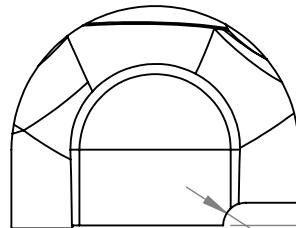
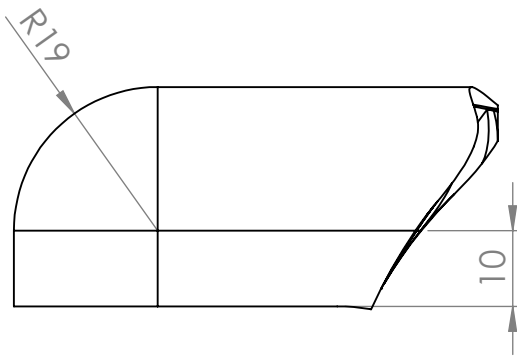
## **Anexo E**

# **Desenho de Definição - Macho de Areia Direito**

Apresenta-se na página seguinte um desenho de definição do macho exterior de areia, do lado direito.



DETAIL A  
SCALE 2 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	PMelo		1-6-14
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

MATERIAL:

Areia de Silica

WEIGHT:

TITLE:

Macho (Direito) -  
Versão 2

DWG NO.

macho\_cavidade\_final\_2

A4

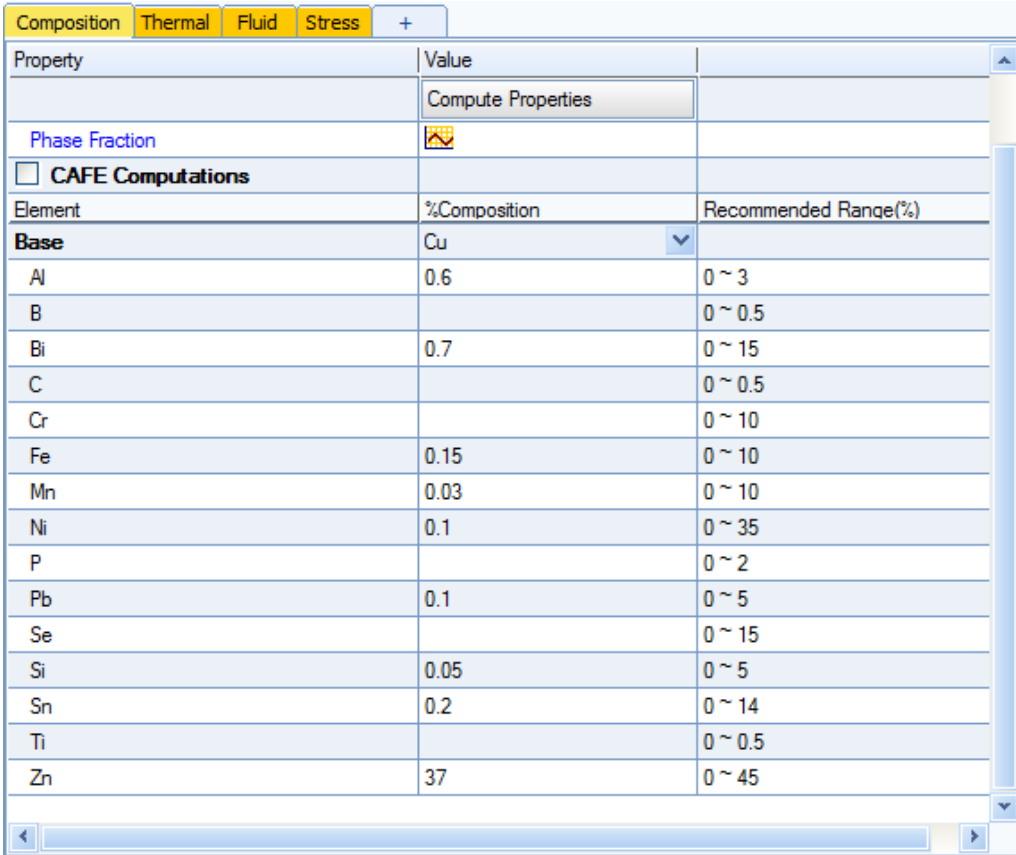
SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

## Anexo F

# Propriedades da Liga Utilizada no ProCAST

Apresentam-se algumas propriedades relevantes para o *software*, da liga adquirida e utilizada para as simulações. Esta liga é, como é explicitado na tabela 4.1 no capítulo 4, muito semelhante à liga utilizada na *CIFIAL*.




Property	Value	
	Compute Properties	
Phase Fraction		
<input type="checkbox"/> CAFE Computations		
Element	%Composition	Recommended Range(%)
<b>Base</b>	Cu	
Al	0.6	0 ~ 3
B		0 ~ 0.5
Bi	0.7	0 ~ 15
C		0 ~ 0.5
Cr		0 ~ 10
Fe	0.15	0 ~ 10
Mn	0.03	0 ~ 10
Ni	0.1	0 ~ 35
P		0 ~ 2
Pb	0.1	0 ~ 5
Se		0 ~ 15
Si	0.05	0 ~ 5
Sn	0.2	0 ~ 14
Ti		0 ~ 0.5
Zn	37	0 ~ 45

Figura F.1: Composição da Liga da Simulação

Liquidus-Solidus				
Liquidus	Const.	914	C	
Solidus	Const.	784	C	

Figura F.2: Intervalo de Solidificação da Liga da Simulação

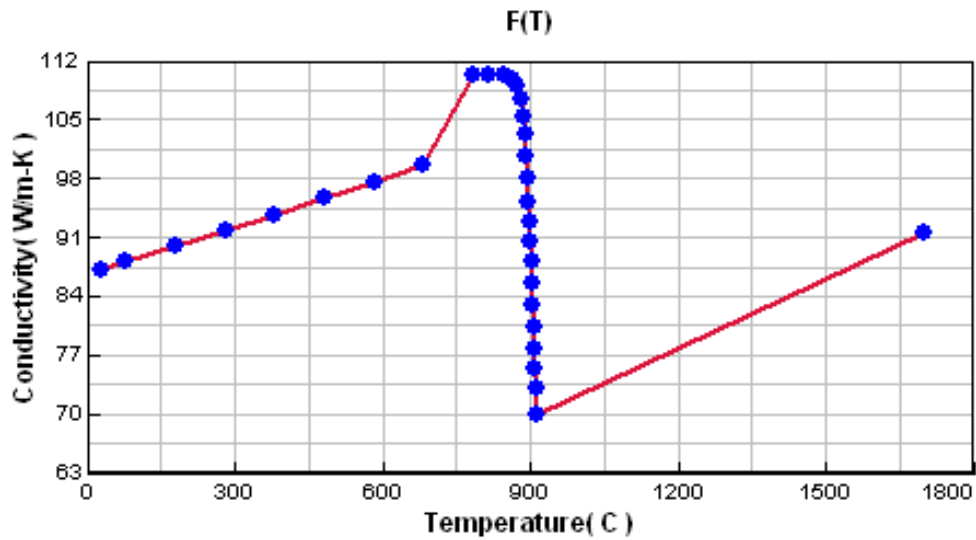


Figura F.3: Condutividade Térmica da Liga da Simulação

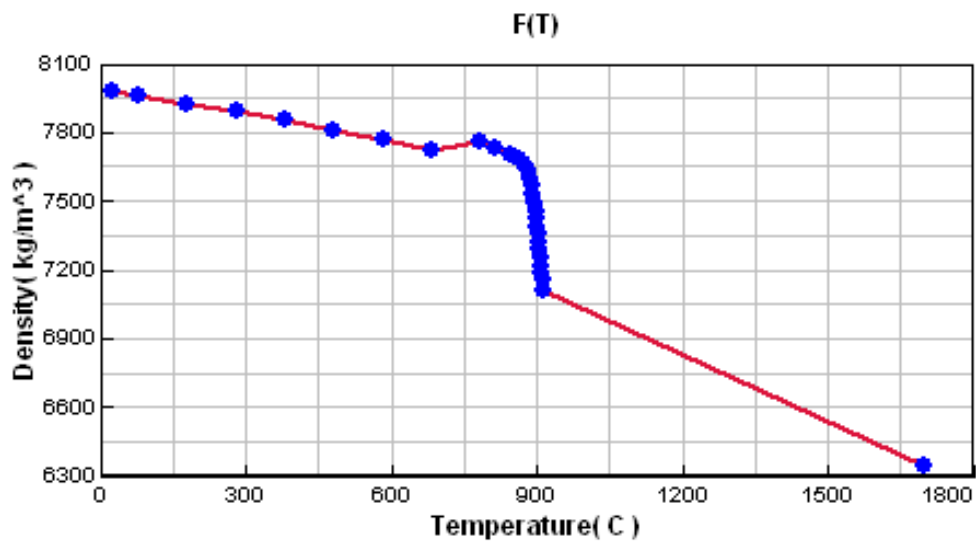


Figura F.4: Densidade da Liga da Simulação

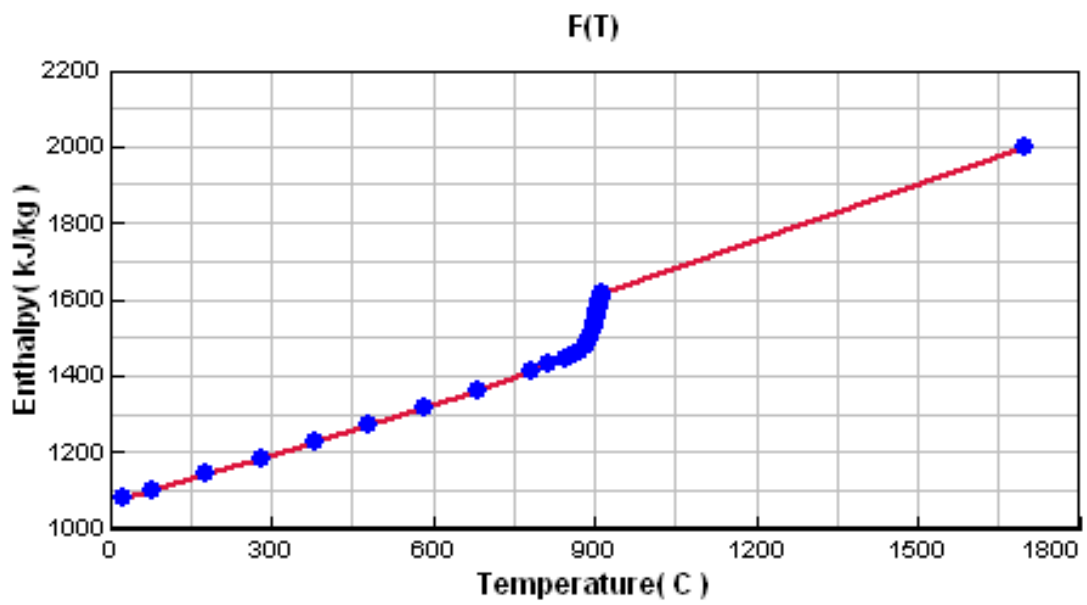


Figura F.5: Entalpia da Liga da Simulação

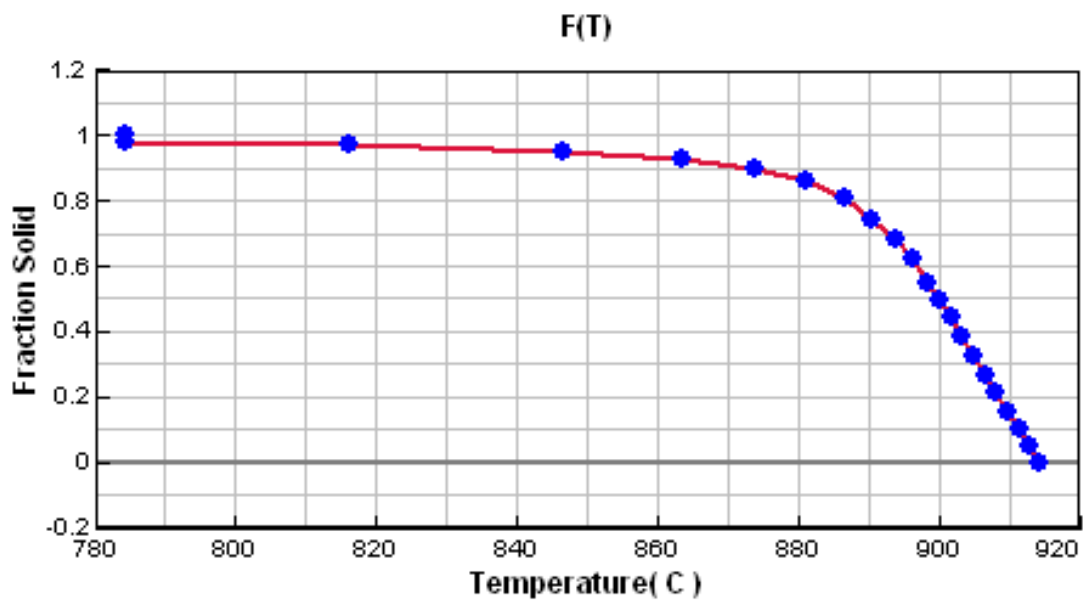


Figura F.6: Fração Sólida da Liga da Simulação

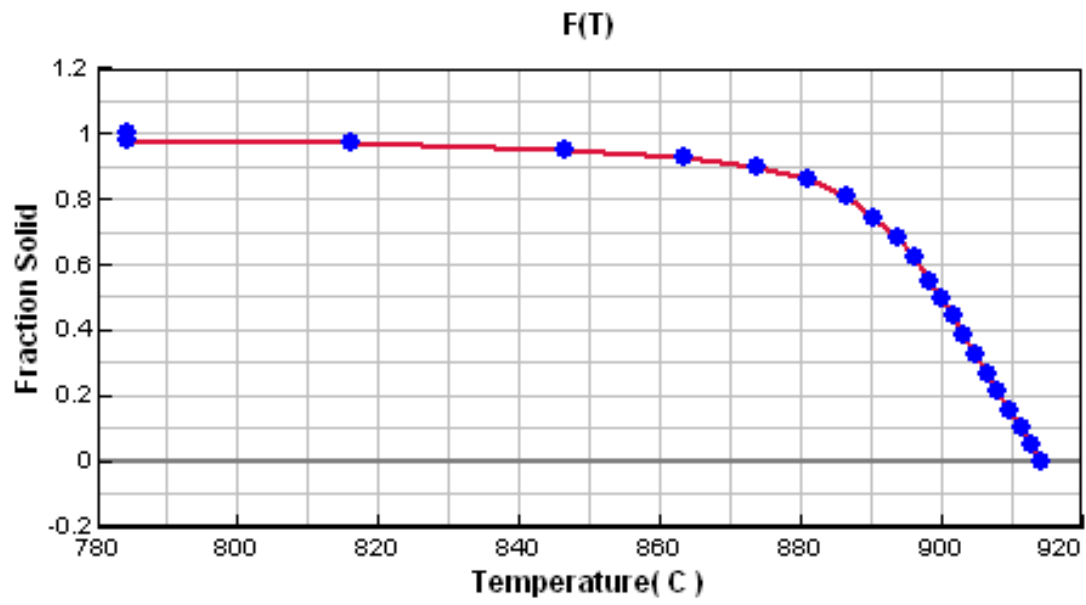


Figura F.7: Viscosidade da Liga da Simulação