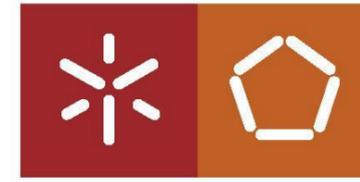




**Desenvolvimento de um processo de fundição
assistido por vácuo:**

João Paulo Barbosa de Faria

UMinho | 2014

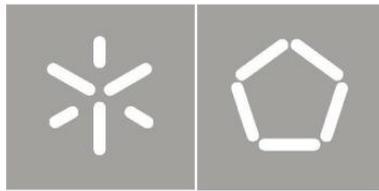


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Paulo Barbosa de Faria

**Desenvolvimento de um processo de fundição
assistido por vácuo:**

Dezembro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Paulo Barbosa de Faria

**Desenvolvimento de um processo de fundição
assistido por vácuo:**

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Delfim Soares
Professor Doutor Joaquim Barbosa



Anexo III

Universidade do Minho

Declaração RepositóriUM: Dissertação Mestrado

Nome: João Paulo Barbosa de Faria

Nº Cartão Cidadão /BI: 10459140

Tel./Telem.: 966 391 598

Correio electrónico: a56516@alunos.uminho.pt

Curso: Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica Ano de conclusão da dissertação: 2014

Área de Especialização: Tecnologias da Manufatura

Escola de Engenharia, Departamento: Engenharia Mecânica

TÍTULO DISSERTAÇÃO/TRABALHO DE PROJECTO:

Título em PT : Desenvolvimento de um processo de fundição assistido por vácuo

Título em EN : Development of a casting process assisted by vacuum

Orientador: Delfim Fernandes Soares

Co-orientador: Joaquim Barbosa

Nº ECTS da Dissertação _____ Classificação em valores (0-20) _____

Classificação ECTS com base no percentil (A a F) _____

Declaro sob compromisso de honra que a dissertação/trabalho de projecto agora entregue corresponde à que foi aprovada pelo júri constituído pela Universidade do Minho.

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação/trabalho de projecto, em suporte digital.

Concordo que a minha dissertação/trabalho de projeto seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto (assinale um):

1. Disponibilização imediata do trabalho para acesso universal;
2. Disponibilização do trabalho para acesso exclusivo na Universidade do Minho durante o período de 1 ano, 2 anos ou 3 anos, sendo que após o tempo assinalado autorizo o acesso universal.
3. Disponibilização do trabalho de acordo com o **Despacho RT-98/2010 c)** (embargo _____ anos)

Braga/Guimarães, ____ / ____ / ____

Assinatura: _____

Agradecimentos

No fim deste ciclo, tenho de agradecer aqueles que tornaram este objetivo possível.

Família

Em primeiro lugar tenho de agradecer à minha esposa e filhos pelo apoio incondicional e pelas horas de que prescindiram de convívio familiar ao longo dos últimos 5 anos.

Aos meus pais que foram os grandes impulsionadores deste projeto pessoal.

Orientadores e grupo de trabalho

A experiência dos orientadores permitiu traçar o caminho a seguir durante este ano de tese. E à disponibilidade do Pedro Correia na realização dos trabalhos práticos.

Comunidade académica

Aos meus colegas mais próximos de mestrado que ajudaram nos estudos, elaboração de trabalhos e discussão nos diferentes temas. Em especial aqueles que me acompanharam nas viagens para Guimarães.

Funcionários dos Laboratórios

Àqueles que integram os diferentes laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica em especial do Laboratório de Metalurgia (Microscopia e Metalografia).

Empresa e colegas de trabalho

Aos administradores da empresa Fernando Simão & Filhos Lda., pela simplificação dos horários de trabalho nos primeiros anos. E aos colegas de trabalho, que além do apoio, também foram pacientes na minha ausência.

Empresas

Às seguintes empresas pela disponibilização de materiais para a realização do trabalho

- Jado Ibéria-Produtos Metalúrgicos Sociedade Unipessoal Lda
- Fundipor, Lda.
- Jerónimos – Carlos & Luís Jerónimo Lda.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Índice de Gráficos	xiii
Lista de abreviaturas e variáveis utilizadas ao longo do texto.....	xvii
Resumo.....	xix
Abstract.....	xxi
1. Introdução	1
1.1 Definição do problema.....	2
3.1. Trabalhos preliminares	3
2. Tecnologia da Fundição	7
2.1. Enquadramento da tecnologia da fundição.....	7
2.2. Enquadramento da fundição na economia	8
2.3. Fundição em coquilha	9
2.4. Utilização do Bronze.....	12
2.5. Indústria sineira	14
3. Uso de vácuo em fundição	17
3.1. Fundição por cera perdida.....	17
3.2. Fundição centrífuga.....	18
3.3. Fundição injetada	19
4. Escolha do processo	23
4.1. Processo selecionado	25
4.2. Idealização e modelação da opção B	25
4.3. Rejeições	29
5. Projeto e construção do vazamento assistido por vácuo	33
5.1. Circuito de Vácuo	33
5.2. Projeto da coquilha.....	34
5.3. Dimensionamento da coquilha de 3 varetas.....	39
5.4. Preparação e procedimentos	42
6. Apresentação e discussão de resultados experimentais e numéricos.....	49
6.1. Análise numérica da coquilha de 3 varetas	49
6.2. Apresentação e discussão de resultados experimentais	68
6.3. Comparação dos ensaios numéricos e práticos.....	77
6.4. Análise de Amostras (Fase 2)	83
7. Conclusões.....	91
8. Trabalhos futuros.....	93
Bibliografia	95
Anexo I.....	99
– Equipamentos utilizados no circuito de vácuo.....	99
Anexo II.....	105
– Recomendações de Higiene e Segurança no Trabalho.....	105
Anexo III.....	111
– Preparação da pintura refratária.....	111
Anexo IV.....	115
– Introdução de dados de pressão no <i>NovaFlow & Solid</i>	115
Anexo V.....	123
– Listagem dos ensaios experimentais realizados	123

Anexo VI.....	127
– Imagens obtidas através do microscópio ótico.....	127
Anexo VII.....	141
– Desenhos coquilha de 3 varetas.....	141
– Desenhos coquilha em câmara de baixa pressão	153

Índice de Figuras

Figura 1; Sino da Liberdade[4].....	2
Figura 2: Coquilha de uma torneira cedida pela empresa <i>Jado Ibéria</i> (Integradora VIII)	3
Figura 3: Moldação reformulada em <i>SolidWorks</i> . A)Moldação B)Torneira e macho	4
Figura 4: Coquilha modelada em Integradora V	4
Figura 5: Coquilha maquinada	5
Figura 6: Coquilha Estática	9
Figura 7: Coquilha Basculante adaptado [7].....	9
Figura 8; Sino da Liberdade[4].....	14
Figura 9: Exemplos de sinos históricos.....	15
Figura 10: Carrilhão de Mafra, adaptado[13].....	15
Figura 11: Fundição por cera perdida assistida por vácuo: A – Mesa de vácuo B – Câmara de vácuo: adaptado [15].....	17
Figura 12: Fundição centrífuga com introdução de gases inertes [16].....	18
Figura 13: Sistema <i>Nelmor</i> , adaptado [17].....	19
Figura 14: Sistema OHSE, adaptado[17][18]	20
Figura 15: Sistema DCRF (Die Casting Research Foundation) [17][19]	20
Figura 16: Sistema de acoplamento de vácuo pela Ngk; adaptado [21]	21
Figura 17: Resultados dos ensaios realizados, adaptado[22].	21
Figura 18: Modelação em câmara fechada com vedação no topo com chapa de estanho/cobre	26
Figura 19: Moldação em câmara de baixa pressão.....	27
Figura 20: Moldação com bacia descentrada	28
Figura 21: Coquilha em câmara de baixa pressão. (A – Câmara bipartida; B – Câmara integral).....	28
Figura 22: Coquilha em câmara de baixa pressão (corte da parte superior da opção B)	29
Figura 23: Vedante Refratário [23]	30
Figura 24: Esquema de eletrodeposição de cobre num metal (Me)	30
Figura 25: Representação da configuração do eletrodo.....	31
Figura 26: Deformação do eletrodo durante o processo de soldadura	31
Figura 27: Equipamentos de Fundição Injetada. A) Câmara quente; B) Câmara fria [24].....	32
Figura 28: Esquema do circuito de vácuo.....	34
Figura 28: Tipos de bacia de vazamento; A) Funil B) Sortilha [25]	37
Figura 29: Desenho em corte da bacia de vazamento.....	37
Figura 30: Escoamento de líquidos e correção do canal de descida	38
Figura 31: Pormenor do canal de vácuo.....	39
Figura 32: Desenho em corte da nova bacia de vazamento	40
Figura 33: Desenho de pormenor da maquinaria do encaixe da bacia de vazamento.....	40
Figura 34: Desenho de pormenor da maquinaria das varetas de 2 e 5mm.....	41
Figura 35: Desenhos de pormenor dos sistemas de escoamento de ar	41
Figura 36: Diagrama de preparação para arranque	44
Figura 37: Diagrama de preparação para cadência de trabalho	45
Figura 38: Diagrama de vazamento.....	46

Figura 39: Diagrama de desmoldação.....	47
Figura 40: Vazamento a 1100°C, à pressão atmosférica e com pré-aquecimento da moldação e bacia a 250°C.....	55
Figura 41: Separação de metal durante o vazamento	63
Figura 42: Varetas e gitos da coquilha de vazamento à nascente.....	64
Figura 43: Moldação para vazamento à nascente	64
Figura 44 A:Coquilha inicial – B: Coquilha de 3 varetas.....	68
Figura 45: Bronze na zona de transição da vareta para o escoamento de ar	69
Figura 46 – A) Ensaio 8; B) - Ensaio 19	76
Figura 47: Seleção de amostras.....	84
Figura 48: Imagens microscópicas da amostra 3 (100kPa)	86
Figura 49: Imagens microscópicas da amostra 9 (40kPa)	86
Figura 50: Bomba de vácuo	101
Figura 51: Esquema da válvula reguladora.....	103
Figura 52: Vacuómetro	103
Figura 53: Uniões ISO KF	104
Figura 54: Amostra - 3 (topo)	129
Figura 55: Amostra- 3 (Centro)	130
Figura 56: Amostra - 3 (Base)	131
Figura 57: Amostra - 6 (Centro)	132
Figura 58: Amostra - 6 (Base).....	133
Figura 59: Amostra - 8 (Topo).....	134
Figura 60: Amostra - 8 (Centro)	135
Figura 61: Amostra - 8 (Base)	136
Figura 62: Amostra - 9 (Topo).....	137
Figura 63: Amostra - 9 (Centro)	138
Figura 64: Amostra - 9 (Base).....	139

Índice de Tabelas

Tabela 1: Vantagens e desvantagens na utilização da fundição em coquilha.	10
Tabela 2: Características físicas adicionais[10].....	13
Tabela 3: Requisitos	23
Tabela 4: Atributos da peça	23
Tabela 5: Mapa morfológico.....	24
Tabela 6: Tabela de valor.....	24
Tabela 7: Equipamentos de segurança dos Laboratórios de Tratamentos Térmicos e Fundição.....	42
Tabela 8: Variáveis utilizadas na análise numérica para o bronze	50
Tabela 9: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de temperatura do bronze (Temperatura da bacia e da coquilha 250°C)	51
Tabela 10: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de temperatura do bronze (Temperatura da bacia e da moldação 400°C)	52
Tabela 11: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia de vazamento (Moldação a 250°C e bronze a 1100°C).....	53
Tabela 12: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia de vazamento (Moldação a 250°C e bronze a 1100°C) Versão reduzida.....	53
Tabela 13: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia de vazamento (Moldação a 400°C e bronze a 1100°C) Versão reduzida.....	54
Tabela 14: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia e moldação (bronze a 1100°C)	55
Tabela 15: Percentagem de enchimento, ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia e moldação (bronze a 1150°C)	56
Tabela 16: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de temperatura de bronze (Temperatura da bacia e moldação 400°C)	57
Tabela 17: Variáveis utilizadas na análise numérica para a liga de Al-Si	58
Tabela 18: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos da liga de Al-Si.....	59
Tabela 19: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do bronze	59
Tabela 20: Variáveis utilizadas na análise numérica para a liga de Cu-Zn (latão)	60
Tabela 21: Percentagem de enchimento nos ensaios numéricos de latão e bronze (Pressão a 1Bar) .	60
Tabela 22: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de latão e bronze (Pressão a 0,4Bar)	61
Tabela 23: Ensaios numéricos do latão	62
Tabela 24: Variáveis utilizadas na análise numérica para a moldação de vazamento em nascente	65
Tabela 25: Ensaios numéricos, resultados dos processos de vazamento em nascente e direto (Temperatura das moldações 250°C)	65
Tabela 26: Ensaios numéricos, resultados dos processos de vazamento à nascente e direto (Temperatura das moldações 400°C)	66
Tabela 27: Amostras usadas nos ensaios metalográficos.....	85
Tabela 28: Ensaios de microdureza	87
Tabela 29: Composição química do lingote e primeira fase de vazamentos.....	88

Tabela 30: Composição química do lingote e segunda fase de vazamentos	88
Tabela 31: Características técnicas da bomba de vácuo, adaptado [26].....	101
Tabela 32: Características técnicas da válvula reguladora- adaptado [27]	102
Tabela 33: Riscos da indústria da fundição, reproduzido de [30]	107
Tabela 34: Densidade do ar	118
Tabela 35: Viscosidade cinemática	120
Tabela 36: Ensaios experimentais	125

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Distribuição da exportação de moldes - 2012[6].....	8
Gráfico 2: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C	51
Gráfico 3: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 400°C	52
Gráfico 4: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha 250°C e do bronze a 1100°C.....	53
Gráfico 5: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha 400°C e do bronze a 1100°C.....	54
Gráfico 6: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia e coquilha, para uma temperatura de vazamento do bronze a 1100°C	56
Gráfico 7: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia e coquilha, para uma temperatura de vazamento do bronze a 1150°C	56
Gráfico 8: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento do bronze, para um pré-aquecimento da coquilha e da bacia a 400°C.....	57
Gráfico 9: Variação da % de enchimento da coquilha com vazamento de latão e bronze com diferentes sobreaquecimentos e diferentes pré-aquecimentos da bacia e coquilha, para pressão interna da coquilha a 1Bar.	61
Gráfico 10: Variação da % de enchimento da coquilha com vazamento de latão e bronze com diferentes sobreaquecimentos e diferentes pré-aquecimentos da bacia e coquilha, para pressão interna da coquilha a 0,4Bar.....	62
Gráfico 11: Variação da % de enchimento da coquilha com vazamento de latão e bronze com diferentes sobreaquecimentos, pré-aquecimentos da bacia e coquilha de 250°C e pressão interna da coquilha a 0,4Bar e 1Bar.	63
Gráfico 12: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha a 250°C e pressão interna da coquilha a 0,4Bar e 1Bar	66
Gráfico 13: Resultados dos processos de vazamento à nascente e direto (Temperatura das moldações 400°C)	67
Gráfico 14: Variação do comprimento da vareta com a pressão interna da coquilha para uma temperatura de vazamento a 1050°C (Fase 2).....	70

Gráfico 15: Variação do comprimento da vareta com a temperatura de vazamento, para uma pressão interna da coquilha de 80kPa (Fase 2) e um pré-aquecimento da coquilha a 200°C.....	71
Gráfico 16: Variação da temperatura de vazamento com a pressão interna da coquilha, para um pré-aquecimento da coquilha à temperatura de 200°C e que ensaios onde se obtiveram varetas completas (Fase 2).....	71
Gráfico 17: Variação do comprimento da vareta com a pressão interna da coquilha para uma temperatura de vazamento a 1050°C e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3).....	72
Gráfico 18: Variação do comprimento da vareta com a pressão interna da coquilha para uma temperatura de vazamento a 1100°C e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3).....	73
Gráfico 19: Variação do comprimento da vareta com a temperatura de vazamento para um intervalo de pressão interna na coquilha de 30kPa a 40kPa e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3).	73
Gráfico 20: Variação do comprimento da vareta com a temperatura de vazamento para um intervalo de pressão interna na coquilha de 50kPa a 80kPa e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3).	74
Gráfico 21: Variação do comprimento da vareta no tempo sem reposição de tinta refratária para uma de pressão interna na coquilha de 100kPa, pré-aquecimento da coquilha à temperatura de 250°C e temperatura de vazamento a 1150°C (Fase3)	75
Gráfico 22: Variação do comprimento da vareta no tempo com a temperatura de vazamento, à pressão atmosférica e pré-aquecimento da coquilha à temperatura de 250°C (Fase4)	76
Gráfico 23: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1050°C (Fase3 – 2mm).....	77
Gráfico 24: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1050°C (Fase3 – 3mm).....	78
Gráfico 25: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1050°C (Fase3 – 5mm).....	78
Gráfico 26: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1100°C (Fase3 – 2mm).....	79

Gráfico 27: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1100°C (Fase3 – 3mm).....	79
Gráfico 28: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1100°C (Fase3 – 5mm).....	80
Gráfico 29: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e pressão interna da coquilha de 40kPa (Fase3 – 2mm).....	80
Gráfico 30: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e pressão interna da coquilha de 40kPa (Fase3 – 3mm).....	81
Gráfico 31: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e pressão interna da coquilha de 40kPa (Fase3 – 5mm).....	81
Gráfico 32: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e um intervalo na pressão interna da coquilha de 50kPa e 80kPa (Fase3 – 2mm)	82
Gráfico 33: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e um intervalo na pressão interna da coquilha de 50kPa e 80kPa (Fase3 – 3mm)	82
Gráfico 34: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e um intervalo na pressão interna da coquilha de 50kPa e 80kPa (Fase3 – 5mm)	83
Gráfico 35: Ensaio de microdureza	87
Gráfico 36: Performance da bomba, adaptado [26]	102
Gráfico 37: Densidade do ar	118
Gráfico 38: Condutividade térmica	119
Gráfico 39: Calor específico	119
Gráfico 40: Viscosidade cinemática.....	121

Lista de abreviaturas e variáveis utilizadas ao longo do texto

Al – Alumínio

ASTM – American Society for Testing and Materials

BCE – Banco Central Europeu

C_p – Calor específico a pressão constante

Cu – Cobre

DCRF – Die Casting Research Foundation

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

k – Condutividade térmica

KF – Klein Flange

Si – Silício

MIEMEC – Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica

n – número de mol(s)

Ngk – Nihon Gaishi Kaisha

P – Pressão

R – Constante universal dos gases ideais (287,053 J·kg⁻¹·K⁻¹)

Re – Número de *Reynolds*

Sn – Estanho

T – Temperatura

TIG – Processo de soldadura (*Tungsten Inert Gas*)

u - Velocidade

UE – União Europeia

V – Volume

Zn – Zinco

μ– Viscosidade dinâmica

v– Viscosidade cinemática

ρ– Densidade

Resumo

A fundição de metais de elevada viscosidade é bastante complexa e obriga em muitos casos à utilização de sobre espessuras para mais tarde serem maquinados. Uma das técnicas usadas para reduzir este problema é o sobre aquecimento do metal tornando-o mais fluido o que permite um melhor preenchimento de baixas espessuras, por outro lado esta solução implica uma maior oxidação e maior reatividade do metal originando a dissolução gases, que aumentam a probabilidade do aparecimento de porosidades nas peças.

Na fundição por gravidade em moldação metálica não é comum a utilização de baixa pressão em metais muito viscosos. Neste trabalho foi possível mostrar que a utilização desta tecnologia pode melhorar o produto final, ou mesmo obter peças que à pressão atmosférica seria impossível. A adição do circuito de baixa pressão pretendia reduzir o atrito com a moldação, diminuindo o efeito da elevada viscosidade do material (por exemplo o bronze). Como objetivo adicional, o trabalho pretendia verificar se era possível o preenchimento de espessuras de parede reduzida, que no processo tradicional por pressão atmosférica não se conseguiam. Para validar os resultados foram realizados ensaios experimentais e a análise numérica através do *software NovaFlow & Solid*.

No final dos ensaios foram obtidas amostras completas de 3 e 5mm, mostrando que o sistema tem capacidade de produzir peças de diferentes dimensões. Também se conseguiram preenchimentos parciais em amostras de 2mm quando foi utilizado vácuo, o que não sucedeu nos ensaios atmosféricos.

Palavras-chave: Coquilha, vácuo, bronze.

Abstract

The casting of high viscosity metals is quite complex and in many cases required over thicknesses for later be machined. The overheating is one of the techniques used to reduce this problem, it turns de metal more fluid and fills better the low thickness, and on the other hand this solution involves additional oxidation and more reactivity resulting in gas dissolution, which increases the probability of the occurrence of porosity in the parts.

In the metal moulding of gravity casting is not common to use low-pressure with highly viscous metals. This study shows that is possible to improve the finished product using low-pressure, or even get parts it would be impossible at atmospheric pressure. The addition of the low-pressure circuit intended to reduce friction with the cast, decreasing the effect of high viscosity material (for example bronze). As an additional target, the study intended to verify if it was possible the filing of reduced thickness, which in the traditional process by atmospheric pressure could not. To validate the results were performed experimental tests and numerical analysis through NovaFlow & Solid software.

At the end, it was obtained samples from 3 to 5 mm, showing that the system has ability to produce parts of different dimensions. Also, it was managed to partial fills in 2mm samples when it was used vacuum, which was not done in atmospheric tests.

Key-words: Metal mould, vacuum, bronze.

1. Introdução

O tema deste trabalho é o *desenvolvimento de um processo de fundição assistido por vácuo*, mais concretamente na utilização de moldação permanente metálica com vazamento por gravidade de bronze. A elevada viscosidade do bronze torna o uso desta tecnologia pouco indicada nos processos tradicionais.

Os pressupostos associados ao tema pretenderam avaliar se a utilização da tecnologia de vácuo consegue aperfeiçoar características de acabamento e preenchimento de peças de reduzida dimensão. Como objetivo adicional era pretendido obter provetes que seriam usados posteriormente como material de adição na soldadura TIG. Atualmente não existem fornecedores de material de adição para este tipo de liga, sobretudo devido à sua fragilidade. Esta inviabiliza a sua obtenção por processos de conformação no estado sólido. Como a liga a soldar possui uma composição química muito específica (teores de $\approx 20\% \text{Sn}$ para produção de sinos) e o processo de soldadura não é muito utilizado industrialmente, o mercado não tem varetas com a composição química desejada. Desta forma o desafio deste trabalho pode ser colocado numa simples questão: *Como obter material de adição para a soldadura de sinos com custo reduzido?*

Com a definição do problema devidamente identificado foram seguidos os passos do projeto mecânico. O projeto da coquilha inicial seguiu o algoritmo usual na indústria [1] [2] [3], sendo a segunda versão uma adaptação da inicial. O *SolidWorks* foi o *software* escolhido para a modelação da coquilha nas duas fases. A análise numérica foi realizada com auxílio do *NovaFlow & Solid* onde se testaram as diferentes combinações de variáveis, permitindo efetuar verificações preliminares e comparativas com outras ligas (Latão e Alumínio). As etapas seguintes foram realizadas com recurso dos diferentes laboratórios disponíveis na Universidade Do Minho conforme se mostra de seguida:

- Maquinagem – Laboratório de Maquinagem.
- Ferramentaria – Laboratório de Maquinagem, Laboratório de Máquinas Térmicas e Laboratório de Fundição.
- Ensaio Práticos – Laboratório de Tratamentos Térmicos e Laboratório de Fundição;
- Análise de Materiais – Laboratório de Metalurgia (Microscopia e Metalografia).

É muito importante salientar, que a fundição assenta sobre muitas variáveis e neste trabalho houve a necessidade de testar várias combinações e delas extrair os resultados para construir o melhor procedimento a seguir. Este trajeto levou à realização de vários ensaios, onde poucos tinham a mesma combinação de variáveis.

A pesquisa e desenvolvimento do trabalho assentaram sobretudo na pesquisa bibliográfica através da consulta de artigos científicos e de livros relacionados com o tema, alguns deles disponíveis fisicamente ou em versão digital na Biblioteca da Universidade do Minho. Também se recorreu ao repositório de outras universidades ou em endereços eletrónicos como a *B-on*. Os conteúdos lecionados e os suportes facultados pelos docentes nas Unidades Curriculares de Tecnologias de Fabrico II, Tecnologias de Manufatura II e Complementos de Física serviram de suporte para o início do projeto. É importante salientar, que a ajuda dos orientadores foi preciosa no momento de efetuar o rastreio da informação recolhida e no ato dos ensaios práticos.

1.1 Definição do problema

O *Liberty Bell* (Figura 1) é um dos sinos mais famosos do mundo e também ostenta a fissura mais distinta. Neste caso a sua inoperacionalidade transformou-o numa peça bastante valiosa e numa atração turística para quem passa em Filadélfia. A realidade mostra que as fissuras inviabilizam o desígnio para o qual os sinos foram feitos, tornando-os na maioria casos peças de sucata.



Figura 1; Sino da Liberdade [4]

Uma possível intervenção para a recuperação dos sinos passa por um processo de soldadura, no entanto não são conhecidos até hoje materiais de adição vulgarmente comercializados que tenham uma composição química próxima dos materiais usados na conceção dos sinos. O processo de soldadura TIG permite soldar com material de adição em atmosfera protegida reduzindo a oxidação da superfície. No entanto é necessário controlar a composição química do material de adição para ajustar à do sino e ao procedimento de soldadura adotado (intensidade, velocidade de soldadura, etc.).

Objetivo

A realização do restauro impõe que o material a usar seja o mais próximo possível da composição do sino para reduzir a probabilidade de interferência acústica. Em virtude dos argumentos expostos foi proposto a escolha ou a criação de um processo que permitisse obter varetas de material de adição.

Propósitos

O interesse na recuperação de sinos está na falta de capacidade financeira de muitas paróquias terem em alienar os equipamentos (caso dos sinos mais recentes) e reporem a diferença para a aquisição de novos. Esta nova abordagem pode criar um novo negócio inovador e a criação de postos de trabalho especializados na recuperação de sinos e carrilhões.

3.1. Trabalhos preliminares

O vazamento em coquilha por gravidade representa uma parte considerável do mercado de peças fundidas de pequenas e médias séries. Apesar de ter um acabamento consideravelmente melhor em relação à fundição em areia, ainda apresenta limitações no preenchimento de espessuras reduzidas em bronze.

Para o progresso do projeto foi aproveitado o trabalho desenvolvido nas Unidades Curriculares Integradora VIII (2012/2013) e de Integradora V pelo Grupo 6 (2013/2014).

Integradora VIII

Em Integradora VIII foi realizado um trabalho que consistia em adaptar um sistema de vácuo à moldação de uma torneira em latão. O estudo desse trabalho foi baseado numa coquilha cedida pela empresa *Jado Ibéria* (Figura 2).



Figura 2: Coquilha de uma torneira cedida pela empresa *Jado Ibéria* (Integradora VIII)

Após garantida a disponibilidade de uma coquilha em fim de vida proveniente do meio industrial, que permitiu o estudo da sua utilização, do comportamento do metal líquido durante o vazamento e do desgaste sofrido ao longo das utilizações. Utilizando conhecimento adquirido e das observações realizadas foi reformulada em *SolidWorks* a coquilha inicial para possibilitar o acoplamento do sistema de vácuo e garantir a selagem da cavidade (Figura 3).

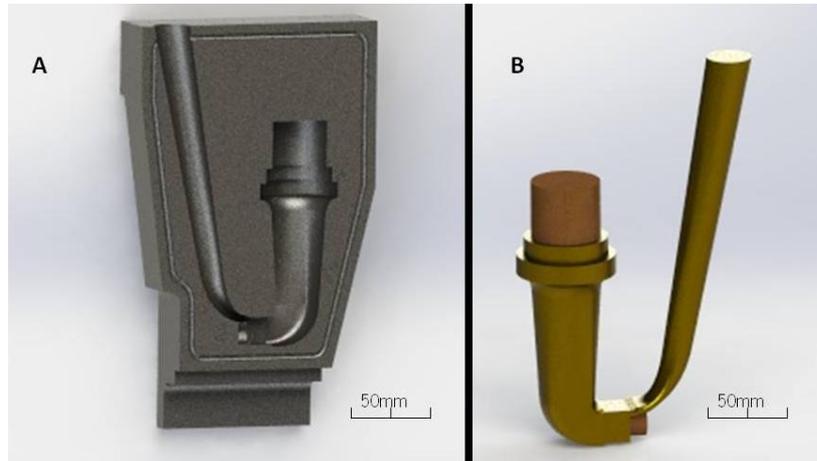


Figura 3: Moldação reformulada em *SolidWorks*. A)Moldação B)Torneira e macho

O novo conceito pressupunha uma única zona de alimentação em nascente que garantiria a depressão na cavidade ao longo de todo o vazamento. Durante a simulação numérica em *NovaFlow & Solid* foi verificada turbulência na zona de transição do canal de descimento com a torneira e a existência de alguns pontos quentes nas zonas mais espessas, ainda assim era previsível o enchimento completo da torneira.

Integradora V

Em Integradora V foi modelada uma coquilha que pretendia obter 4 varetas por vazamento, que seriam usadas para soldadura no restauro de sinos.

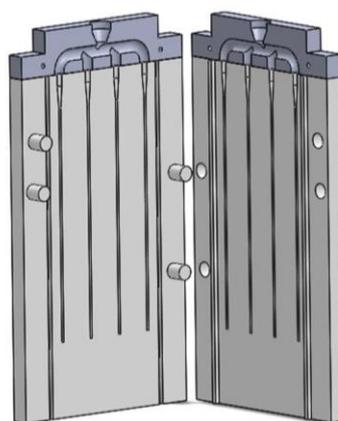


Figura 4: Coquilha modelada em Integradora V

Do trabalho realizado pelo grupo foi maquinada uma coquilha capaz de produzir uma vareta com $108 \times \varnothing 3 \text{mm}$ (Figura 5). Na construção foi feita uma simplificação do projeto inicial para aumentar a probabilidade de conseguir vazamentos bem-sucedidos. No local onde assentava a bacia foi colocada uma chapa de estanho cuja finalidade era tapar a entrada de ar na moldação.

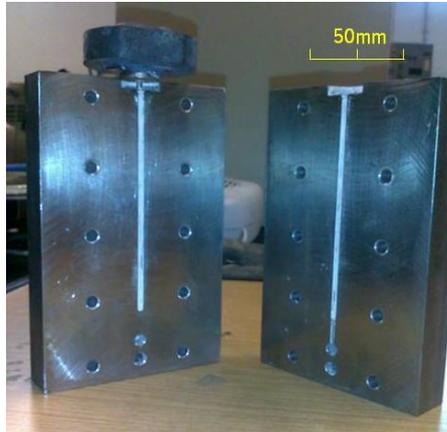


Figura 5: Coquilha maquinada

Dos ensaios realizados no âmbito de Integradora V saíram peças inviáveis e de tamanho reduzido. No primeiro ensaio verificou-se que o tempo de fusão da chapa originava a solidificação do bronze na bacia, o segundo ensaio deu origem a uma vareta mais comprida, ainda assim longe do valor pretendido (108mm).

2. Tecnologia da Fundição

Este capítulo pretende sensibilizar para a importância do setor da fundição na economia nacional e as implicações que poderão surgir caso se torne residual no panorama do atual parque industrial. Esta abordagem está centrada no contexto macroeconómico e de forma genérica.

2.1. Enquadramento da tecnologia da fundição

A Fundição é uma indústria transformadora que viu nos últimos anos um decréscimo de investimento na Península Ibérica. Em Portugal é visível a quantidade de empresas que passam dificuldades para se manterem competitivas (como Fundição de Oeiras, Siderurgia Nacional ou a Fundição Dois Portos). No entanto, há novos mercados e produtos a explorar, para além da manutenção dos mercados tradicionais.

Este sector, relevante para a economia portuguesa, não pode competir com o preço praticado pelos produtores asiáticos e sul-americanos, sobretudo, porque Portugal não possui mão-de-obra barata, tem regras ambientais rigorosas e importa muita da matéria-prima que utiliza. Uma das possíveis apostas passa pelo investimento na qualidade e no valor acrescentado dos produtos, à imagem do que acontece na indústria do calçado, que comparado com a China (por exemplo) se exporta em menor quantidade, mas com um volume de faturação por par muito superior.

Outro aspeto a salientar, é o facto de a fundição ser parte integrante no processamento de qualquer componente metálico, mesmo que seja apenas na produção de lingote primário. Contra a corrente de desinvestimento, há um aumento significativo na reciclagem de sucatas, resíduos da indústria metalomecânica ou aproveitamento de materiais provenientes dos ecopontos ou dos centros de abate de veículos. Depois de devidamente separados estes materiais vão para as siderurgias que, após a afinação do banho, dão origem a lingotes com a mesma composição química do lingote primário, com uma redução significativa no consumo de energia.

Paralelamente à indústria há um circuito logístico de fornecimento e escoamento de produtos que não pode ser desprezado, como areias, energia, moldações, madeira, resíduos, transportes, entre muitos outros. O posicionamento geoestratégico permite ao país escoar os produtos com alguma facilidade para qualquer parte do mundo.

2.2. Enquadramento da fundição na economia

É prática comum assumir que Portugal é um produtor doméstico e que poucos produtos têm capacidade de exportação. Ao contrário da opinião geral, o mercado automóvel tem muito peso na economia nacional, pois 85% da produção da fundição é exportada e o seu principal destino é a indústria automóvel [5].

O peso da indústria vai para além dos fundidos, Portugal é uma referência internacional na conceção de moldes escoando quase toda a produção para os mercados internacionais, que desde 2004 foi sempre superior a 75%, onde a Europa tem especial relevância (Gráfico 1) [6]. Mais uma vez o setor automóvel é o maior comprador, com 72% da produção [6]. Estes resultados mostram a capacidade nacional de valorização do produto, aliado ao elevado rigor, qualidade de projeto e mão-de-obra especializada no setor metalomecânico.

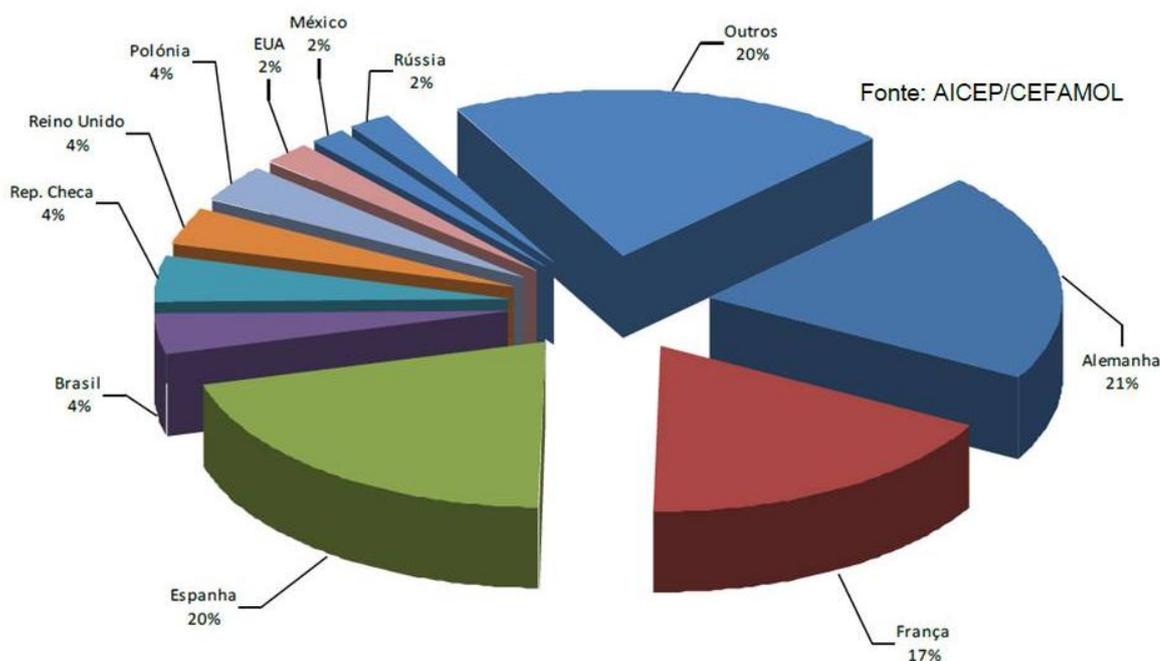


Gráfico 1: Distribuição da exportação de moldes - 2012 [6]

Desta forma fica demonstrado que Portugal tem espírito empreendedor e que mesmo em áreas que se julgam perdidas, ainda pode inovar e ser referência de mercado. Como desafio adicional fica a mensagem à comunidade académica para incentivar os alunos a escolher temas de tese de Mestrado ou Doutoramento no âmbito da Fundição e tentar recuperar o que outrora no distrito de Braga era uma indústria que empregava uma cota considerável da população.

2.3. Fundição em coquilha

A fundição em coquilha tem um conceito simples, a moldação é geralmente feita em metal (na maioria dos casos é utilizado aço) e usa a gravidade para preencher a cavidade moldante. Em peças complexas podem ser usados machos em areia e as coquilhas podem ter corredeiras ou apêndices pivotantes para gerar cavidades ou detalhes na superfície que entram em conflito com os ângulos de saída da peça. Este processo é muito utilizado para colocar insertos nas peças, ou seja, é possível acrescentar componentes pré-fabricados na moldação que mais tarde fazem parte da peça final. Esta tecnologia está dividida em dois tipos:

Estático – Este processo é caracterizado por manter a coquilha fixa sendo o metal vazado na bacia que alimenta todo o circuito de alimentação e distribuição em simultâneo (Figura 6).

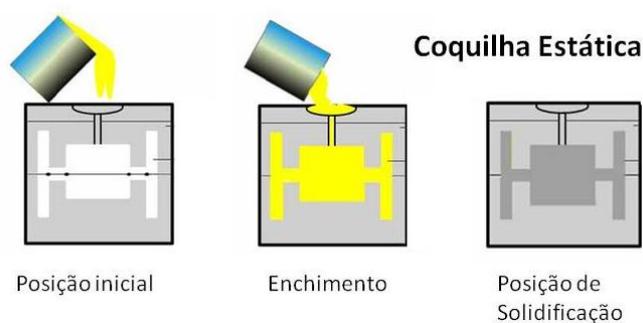


Figura 6: Coquilha Estática

Basculante – É caracterizado facto da coquilha estar inclinada, o metal é vazado na bacia, só depois de a bacia estar cheia a coquilha é rodada distribuindo então o metal até que esta fique na posição de abertura (Figura 7).

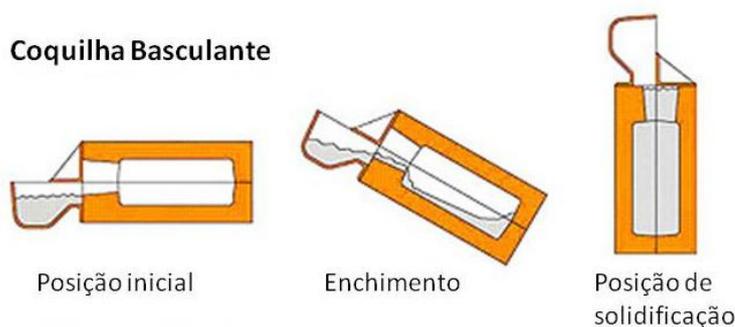


Figura 7: Coquilha Basculante adaptado [7]

O processo estático foi o escolhido para testar o sistema de vácuo, tendo em conta que é aquele permitia uma simples adaptação do circuito, o seu dimensionamento é mais simples e necessita de menos custos.

Comparativamente à fundição por areia, líder na indústria, o processo de gravidade tem algumas vantagens na altura de escolher a tecnologia a implementar (Tabela 1) [1]:

Tabela 1: Vantagens e desvantagens na utilização da fundição em coquilha.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> – Moldação permanente; – Maior cadência de produção; – Melhor acabamento superficial; – Menor custo de implementação; – Circuito de automatização simplificado; – Menor área de implementação; – Peças mais limpas; – Oficinas mais limpas; – Mais fácil automatização; – Em muitos casos formam produto acabado; – Geometrias e pormenores mais complexos; – Os ângulos de saída podem ser mais apertados. 	<ul style="list-style-type: none"> – Custo para séries pequenas; – Limitação de peso e dimensão; – Apenas aplicável em ligas de baixo ponto de fusão; – Pré-aquecimento dos moldes; – Tempo de iniciação de série mais longo. Os moldes demoram mais tempo a serem produzidos; – Limitações em algumas geometrias (ângulos de saída); – Limitado a ligas de baixa viscosidade. – Contra indicado para ligas que libertem gases durante o arrefecimento; – Não se deve usar ligas que ataquem as moldações.

É importante frisar a inexistência de uma liga que respeite todos os critérios acima definidos, logo recai sobre o projetista a responsabilidade de definir quais as prioridades a respeitar.

Quando se considera a fundição em coquilha como o processo mais indicado é a altura de ajustar as inúmeras variáveis que influenciam os resultados finais e a cadência de produção. Na fundição em geral o simples facto de iniciar a produção de uma série no Inverno ou no Verão pode ditar o êxito da operação. Ficam aqui enumeradas algumas das variáveis mais importantes e alguns dos efeitos negativos que delas podem surgir quando mal controladas [1] [2]:

- Temperatura do metal vazado:
 - Muito baixa – Neste caso há o risco de as peças não ficarem devidamente preenchidas, as secções finas solidificam demasiadamente rápido e podem aparecer gotas frias;
 - Muito alta – Durante o arrefecimento aumenta a taxa de contração e conseqüente dificuldade em garantir toleranciamento, podem distorcer os moldes, na maior parte das ligas aumenta a taxa de oxidação.

- Pré-aquecimento da coquilha:
 - Muito alta – Aumenta o tempo de arrefecimento, reduz o tempo de vida do equipamento, reduz a cadência de produção e reduz propriedades mecânicas superficiais;
 - Muito baixa – Arrefecimento rápido da peça, falhas de preenchimento em zonas de diferente espessura podem surgir fissuras, devido ao rápido arrefecimento das secções mais estreitas.
- Pintura refratária:
 - Em excesso – Pode gerar uma película de cascão obrigando a operações de trabalho adicionais, aumento da rugosidade superficial, dificuldade em manter toleranciamento e pode obrigar à limpeza da moldação entre operações;
 - Por defeito – O rápido arrefecimento da peça implica falhas de preenchimento;
 - Granulometria elevada – Maior rugosidade superficial, incrustações de refratário na peça, maior probabilidade de ser arrastado.
- Presença de humidade:
 - Se a humidade relativa for elevada esta implica uma maior oxidação das peças, em ligas muito reativas pode provocar acidentes. Esta situação é muito provável acontecer no início da semana ou do dia de trabalho, quando a fábrica está no ritmo normal o calor dos fornos reduzem a humidade relativa.
- Tempo de arrefecimento da peça:
 - Em excesso – Reduz a cadência de produção e obriga a reaquecer a coquilha.
 - Por defeito – Provoca a deformação da peça e aumenta o risco de acidentes de trabalho.

As variáveis acima descritas são aquelas que não dependem do projeto, mas sim da experiência das empresas e dos seus operadores. Naturalmente todo o projeto é importante desde a bacia de vazamento, canal de descida, alimentação, distribuição, machos, enxertos, fecho, sistema de extração, no entanto de nada vale dominar as variáveis se o projeto foi mal dimensionado.

2.4. Utilização do Bronze

Assumindo a Europa como referência, o bronze é uma liga de cobre cuja importância histórica designa uma vasta época temporal onde imperavam os mais fortes, terminando com a Idade do Ferro. Devido ao seu relativo baixo ponto de fusão o Homem desde cedo conseguiu construir moldações em argilas criando os primeiros ornamentos para ostentar indicando o seu posto hierárquico numa comunidade [8]. Com o desenvolver da técnica novos componentes foram criados desde pequenas peças de decoração até componentes bélicos (gládio e revestimentos de escudos). O bronze ao longo dos anos deixou de ter apenas utilidade em peças ornamentais e bélicas para ter uma vasta aplicação em componentes mecânicos.

Não são conhecidas, até à data, práticas de vazamento de bronze em coquilha que tenham tido sucesso. O caráter frágil, altamente viscoso e de oxidação rápida tornam a liga pouco utilizada com esta tecnologia, sobretudo em aplicações de secção fina. O *Sindicato Geral dos Fundidores de França (SGFF)* previa boas perspectivas no vazamento por gravidade em atmosfera de azoto, dado que esta técnica evitaria a rápida oxidação do metal [2].

Os bronzes ainda hoje são usados devido ao baixo coeficiente de atrito que têm na formação do par tribológico. Durante muitos anos foram usadas chumaceiras deste material devido ao seu caráter auto lubrificante, sobretudo quando na constituição constava chumbo. Ainda na área da mecânica e usufruindo das qualidades de um terceiro elemento (ex.: Alumínio, Zinco, Fosforo, entre outros) é muito usado em parafusos, porcas, válvulas, canhões de irrigação, hélices, etc.

Por fim, salienta-se que é uma liga muito apreciada pelas suas propriedades acústicas, cuja aplicação é feita em sinos e instrumentos de sopro. Este é o tipo de liga que foi testado no processo de fundição assistida por vácuo, tema do trabalho elaborado. Um dos objetivos bem-sucedidos do processo foi a capacidade de obter varetas com 3mm de diâmetro, que mais tarde foram utilizadas para soldar sinos que estavam inutilizados devido às fissuras.

Ligas utilizadas

Os lingotes utilizados durante o trabalho têm a composição química correspondente aos bronzes de estanho e pertencem às séries C91300 e C92800. A diferença entre os 2 lingotes está na presença de chumbo na série C92800.

Os bronzes de estanho utilizados são extremamente resistentes à corrosão, desgaste e tem um baixo coeficiente de atrito no par com o aço. Devido a estas características é muito utilizado em rolagens, engrenagens, segmentos, válvulas, uniões adaptativas, moentes e sinos. Em contrapartida,

as peças de fundição tem um fraco acabamento superficial, apresentando-se geralmente muito rugoso. Estes materiais são substancialmente mais dúcteis e com uma maior tensão de cedência que os latões vermelhos, também podem ter uma temperatura de trabalho muito superior às ligas com chumbo [9].

A adição de chumbo na liga melhora a sua aptidão para maquinaria e estanquicidade quando estão sob pressão, no entanto esta alteração na constituição reduz ligeiramente a tensão de cedência e a ductilidade. Na Marinha Norte Americana os bronzes de estanho-chumbo são apreciados pela resistência à corrosão em válvulas, uniões e em retentores de pressão (até 290°C). Quando sofrem processos de soldadura ou brasagem não contraem ao arrefecerem. As duas ligas são processadas por fundição sobretudo em areia, molde cerâmico e centrífuga, sendo possível a utilização de outros processos com exceção da fundição injetada. Na Tabela 2 estão representadas algumas características físicas.

Tabela 2: Características físicas adicionais [10]

	C91300	C92800
Lingote	194	295
Densidade	8.802	8.774
Maquinabilidade	10	70
Tensão de cedência (MPa)	241	276
Módulo de elasticidade (MPa)	110.000	110.000
Tensão limite 0.5% (MPa)	207	207
Extensão (%)	0.5	1
Dureza (HB 3000kg)	160	-
Dureza (Rockwell "B")	-	80
Fusão Liquidus (°C)	818	818
Fusão Solidus (°C)	889	955
Alívio de tensões por tratamento térmico (°C)	260	260
Calor específico (J/kg·K)	377	377
Condutividade térmica (Wm·K ⁻¹) a 273K	70.6	58.2
Condutividade elétrica (Megmho7cm a 20 °C)	0.04	-
Resistividade elétrica (nΩ·m a 20°C)	250	-
Tecnologias da fundição		
Sobreaquecimento mínimo		
Processo ligeiros (°C)	1040	1175
Indústria pesada (°C)	980	1065
Sobreaquecimento máximo		
Processo ligeiros (°C)	1095	1260
Indústria pesada (°C)	1040	1175
Contração linear (mm/m)	0.008	0.008
Contração superficial (mm ² /m ²)	0.016	0.016
Contração volumétrica (mm ³ /m ³)	0.024	0.024
Tecnologias de soldadura		
Brasagem	Excelente	Excelente
Soldagem a maçarico	Bom	Bom
Soldagem oxiacetilénica	Aceitável	Não recomendável
Soldagem por arco elétrico com gás de proteção (MIG/MAG)	Aceitável	Não recomendável
Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido	Aceitável	Não recomendável
Soldagem com arco de carbono	Aceitável	Não recomendável

2.5. Indústria sineira

Os sinos estão intimamente ligados à História da Humanidade, os seus sons transmitem mensagens e melodias, que ainda têm algum peso em várias situações do quotidiano, podendo alguns ter um peso histórico muito grande. Mesmo as campainhas de pequeno tamanho resistem à evolução pelo seu valor simbólico, como as sinetas de hotel.

Contexto histórico

No Mundo

A arte sineira tem muitos exemplares espalhados pelo mundo, onde alguns são conhecidos pela sua imponência e outros pelo que representam.

O Grande Sino de Dhammazedí:

Este sino terá sido até à data o maior sino construído, oferecido pelo rei Dhammazedí ao Pagode Shwegagon em Myanmar era feito em bronze e pesaria aproximadamente 297,000kg. Filipe de Brito e Nicote, um explorador português, terá roubado o sino com intenção de o fundir para construir canhões [11]. No entanto, durante o transporte a jangada que o transportava ter-se-á quebrado e o sino afundado na confluência dos rios Bago e Yangon.

O Sino da Boa Sorte:

Dentro dos colossos este é o mais recente, tendo sido fundido em 2000 na China e pesa 116,000kg. Está no Templo de Foquan em Pingdingshan - Henan, na zona oriental da China. Segundo os atuais dados é o mais pesado em funcionamento.

O Sino da Liberdade

Este sino é o símbolo da Independência Norte Americana (1776) e do movimento de abolição da escravatura, que lhe deu o nome em 1839. Tem uma fissura que o caracteriza e a qual foi alvo de tentativas falhadas de reparação, a primeira fissura foi provocada logo na sua primeira utilização.



Figura 8; Sino da Liberdade [4]

Para além destes existem outros, cuja importância ou fama não são menos relevantes, sendo os abaixo indicados alguns deles:

- Sinos da Catedral de Notre Dame (Paris, Figura 9A), recentemente substituídos;
- Tsar Kolokol (Moscou, Figura 9B);
- Great Paul (Londres, a Figura 9C exibe a moldação que deu origem);
- Big Ben (Londres, Figura 9D);
- Big Bell Temple (Pequim, Figura 9F).

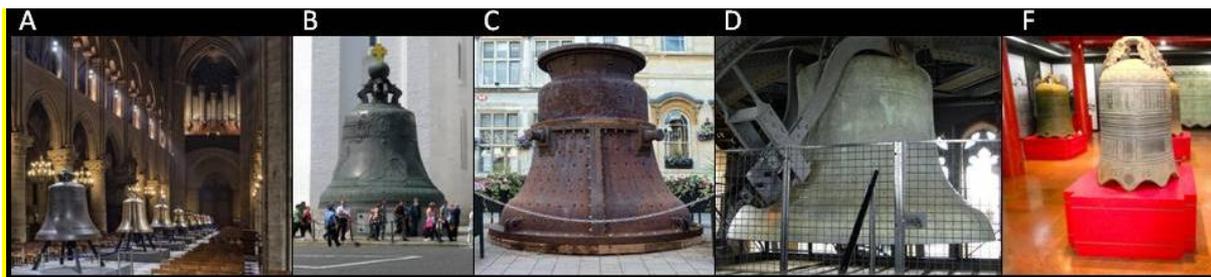


Figura 9: Exemplos de sinos históricos.

Portugal

Em Portugal, sobretudo no Minho, devido à importância das atividades Cristãs associadas à cidade de Braga esta indústria ainda se encontra ativa. Todas as igrejas e muitas capelas possuem sinos, sendo o maior conjunto o carrilhão da Sé de Braga, que tem entre elementos ativos e inoperantes expostos no Tesouro da Sé mais de 200 exemplares. O fosso de fundição mais antigo conhecido em Portugal situa-se na igreja de Dume, que data do século X ou XI [12]. O destino desta indústria secular está entregue às últimas fundições, em Braga a família Jerónimo mantém esta indústria secular sendo uma das empresas de referência no setor.

O Real Convento de Mafra tem dois carrilhões (Figura 10), sendo um dos mais antigos da Europa, mandado construir pelo rei D. João V às fundições de Nicolau Levasseur em Liège (Torre Norte) e de Willem Witlockx em Antuérpia (Torre Sul). Cada carrilhão tem 58 sinos [13].



Figura 10: Carrilhão de Mafra, adaptado [13]

Restauro

Ainda hoje muitos sinos não são recuperados devido à complexidade do processo, sobretudo nos carrilhões onde cada sino tem a nota acústica correspondente. Uma intervenção menos cuidada interfere na sua acústica, consequência da alteração da composição química e a afetação térmica das zonas a tratar. Exemplos disso são alguns dos equipamentos referidos que não foram recuperados ou foram repostos por equipamentos novos.

Um dos objetivos do trabalho é obter varetas de soldadura que tenham a composição química ajustada ao restauro destes equipamentos muito sensíveis.

Curiosidade

Em Portugal existiam 4259 freguesias antes da reforma administrativa realizada em 2013, todas elas possuíam pelo menos um mosteiro, igreja ou capela, que corresponde no mínimo a um sino por edifício. Cada freguesia tem em média 1000kg de bronze entre sinos ativos e inoperantes, caso essas peças fossem vendidas em sucata ($\approx 3\text{€}/\text{kg}$), o valor obtido seria um pouco mais que 12 milhões de Euros. Caso fosse vendido como limpos (máximo de $7\text{€}/\text{kg}$) o resultado seriam 29,8 milhões de Euros.

Portugal tem 382.500kg de reservas de ouro, que estava avaliado em 16,3 milhões de Euros em 2012 quando a cotação ainda estava em alta [14].

Resumidamente há uma reserva nacional de bronze ao nível das reservas de ouro nacionais. Outra conclusão que se pode tirar, é que a indústria sineira tem um vasto mercado interno que não pode ser menosprezado.

3. Uso de vácuo em fundição

O uso de vácuo é prática corrente em várias das tecnologias de fundição, como as de cera perdida, centrífuga ou injetada. Tendo em conta que o tipo de moldação mais aproximada é a da fundição injetada foram estudadas as principais tecnologias de vácuo aplicadas nesta área. Ainda assim algumas das técnicas usadas têm fundamentos na base da experiência de várias tecnologias.

3.1. Fundição por cera perdida

Em fundição por cera perdida, sobretudo em cachos de joalheria e próteses dentárias de pequena dimensão, é recorrente a utilização de vácuo para ajudar no preenchimento da moldação, onde a maioria dos equipamentos são fornecidos com a possibilidade de acoplar um equipamento de vácuo.

Existem duas técnicas dominantes nesta prática como ilustra a Figura 11.

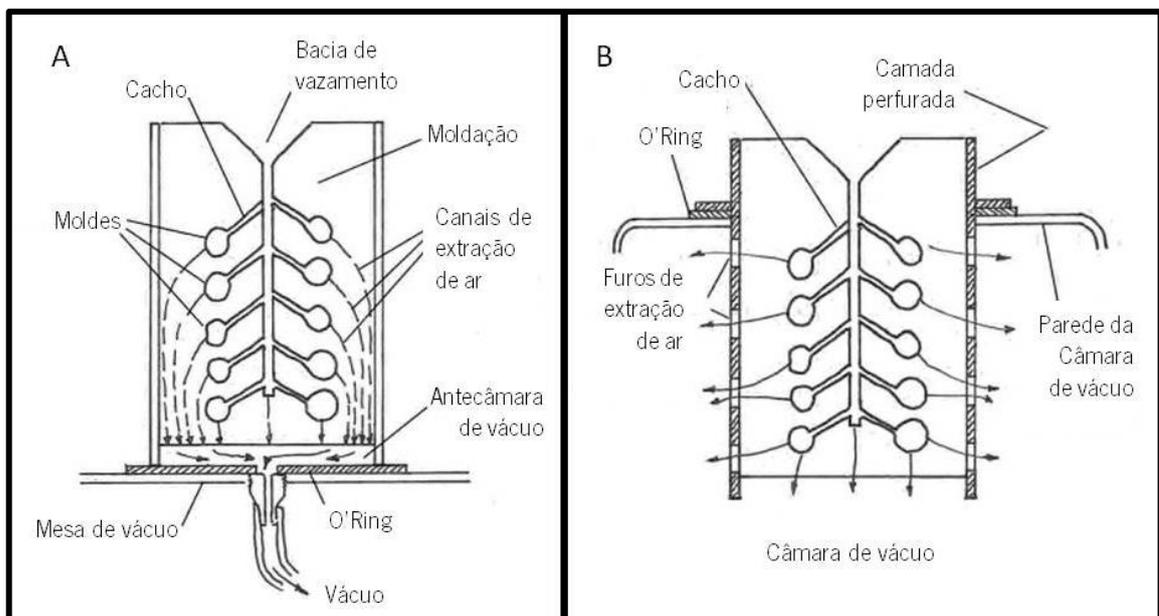


Figura 11: Fundição por cera perdida assistida por vácuo: A – Mesa de vácuo B – Câmara de vácuo: adaptado [15]

Mesa de vácuo – A moldação é colocada sobre a plataforma da mesa e o ar é removido pela parte inferior. A moldação tem que ser revestidas com uma camada fina de um polímero para evitar entrada de ar na moldação. A vantagem deste processo é não haver restrições na geometria da moldação, bastando apenas que a sua base seja plana e seja projetada uma antecâmara.

Câmara de vácuo – A moldação é introduzida numa câmara ficando apenas a parte superior no exterior. Esta configuração limita a dimensão da moldação, em contrapartida a remoção de ar é feita pelas paredes da moldação tornando-a mais eficaz, o que anula a necessidade dos canais de extração.

Atualmente há equipamentos de joalheria, que permitem realizar as fases de fusão e vazamento inteiramente em ambiente de baixa pressão ou com gases inertes. Estes equipamentos para além de garantirem um melhor preenchimento das moldações, também reduzem a oxidação do metal vazado, devido à redução de oxigénio presente na câmara.

3.2. Fundição centrífuga

Na fundição centrífuga também é frequente encontrar equipamentos que usam a baixa pressão ou gases inertes na câmara, como complemento à tecnologia, para melhorar o preenchimento e reduzir a probabilidade de oxidação, sobretudo quando se trabalha com ligas de titânio.

Na Figura 12 estão representados todos os passos do início da fundição centrífuga onde consta a remoção de ar e a introdução dos gases inertes.

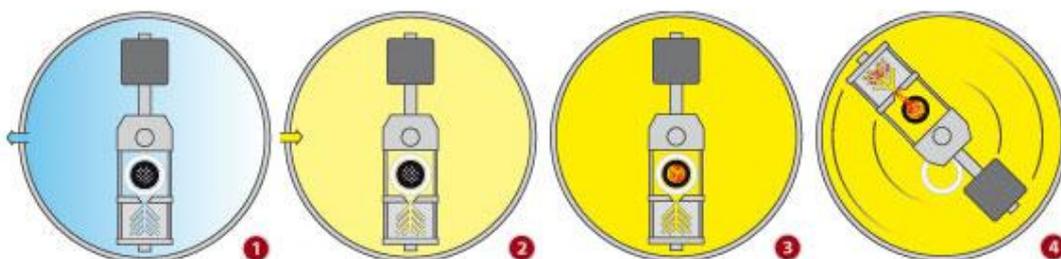


Figura 12: Fundição centrífuga com introdução de gases inertes [16]

Passos para iniciar o processo de vazamento:

1. – Remoção do ar;
2. – Introdução do gás;
3. – Selagem da câmara e aquecimento;
4. – Vazamento por força centrífuga.

O processo acima descrito pode ser utilizado apenas com vácuo sem a necessidade da utilização de gases inertes, bastando para isso saltar o segundo passo.

3.3. Fundição injetada

Na fundição injetada um dos problemas habituais é a presença de ar na cavidade moldante. Nos metais viscosos as saídas de ar tendem a ser reduzidas e não compensam o caudal de metal líquido provocando porosidades adicionais nos componentes. Também é uma tecnologia de exige robustez dos seus componentes, devido à conciliação da temperatura e elevadas forças de trabalho, que reduz significativamente a plena eficácia na criação de depressão na cavidade.

Principais procedimentos de vazamento em vácuo

Dos inúmeros procedimentos usados, alguns patenteados, definem sobretudo as seguintes variantes para esta tecnologia; o grau de vácuo, como o obter e as circunstâncias de execução. De uma forma genérica estas podem ser classificadas em três grandes classes:

Depressão à volta da moldação – Este sistema pressupõem a construção de uma câmara hipobárica em torno da moldação, que é selada com uma junta hermética que garante a depressão em todo o espaço da moldação. A extração do ar é iniciada durante o fecho da moldação até ao segundo estágio do pistão, altura em que o metal é injetado na moldação. Este processo é muito utilizado na injeção de polímeros devido à baixa temperatura de processamento. (Sistema *Nelmor* -Figura 13).

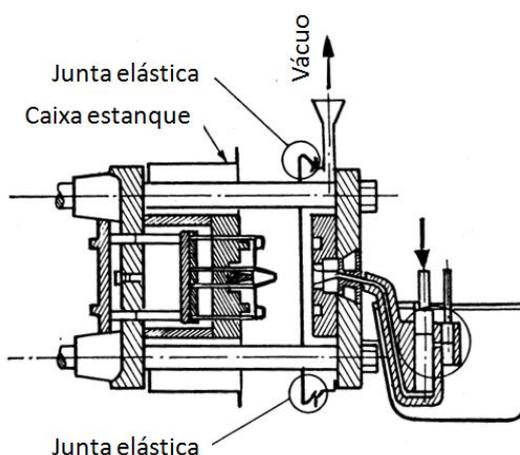


Figura 13: Sistema *Nelmor*, adaptado [17]

Depressão na cavidade moldante – Esta opção consiste em criar o vácuo diretamente na moldação, sendo usadas juntas em torno da moldação e segmentos no pistão. Nalguns casos são feitos vários canais de escoamento que são conduzidos para uma câmara de baixa pressão construída na moldação móvel, noutros ainda, são feitos vários canais que ligam diretamente à bomba.

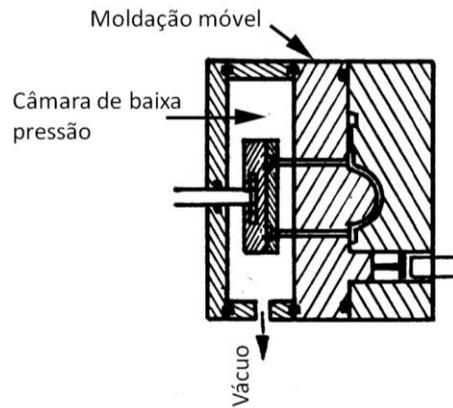


Figura 14: Sistema OHSE, adaptado [17] [18]

Remoção de ar instantâneo – Neste caso há uma remoção de ar da cavidade em larga escala durante o processo. Este processo tem duas fases; na primeira o ar é retirado de forma instantânea através de uma bomba de elevado caudal, na ligação à moldação existe uma junta com estrias geralmente feita em cobre. O cobre tem como particularidades uma baixa inércia térmica e uma elevada condutibilidade (facilmente arrefecido com água). Na segunda fase, o rendimento da remoção de ar é aumentado pela dilatação do cobre, que mantém a bomba em funcionamento durante todo o processo até o canal ser obstruído pela vedação. Este processo garante uma maior margem de manobra na sincronização de movimentos de fecho e enchimento da moldação, com o acionamento da bomba de vácuo.

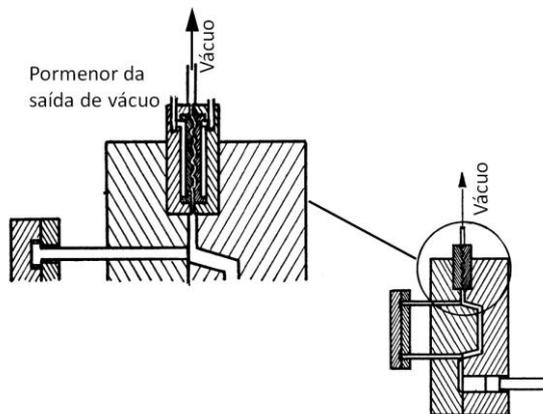


Figura 15: Sistema DCRF (Die Casting Research Foundation) [17] [19]

O sistema de acoplamento e de abertura/fecho foi desenvolvido pela DCRF em 1959 e entretanto foi melhorado por várias empresas como a Honda, Ngk, Nissan ou a Aluminium Company of America, que referenciam a patente original da DCRF [20]. A que mais se destaca pela sua simplicidade é o sistema patenteado pela empresa nipónica Ngk exibido na Figura 16.

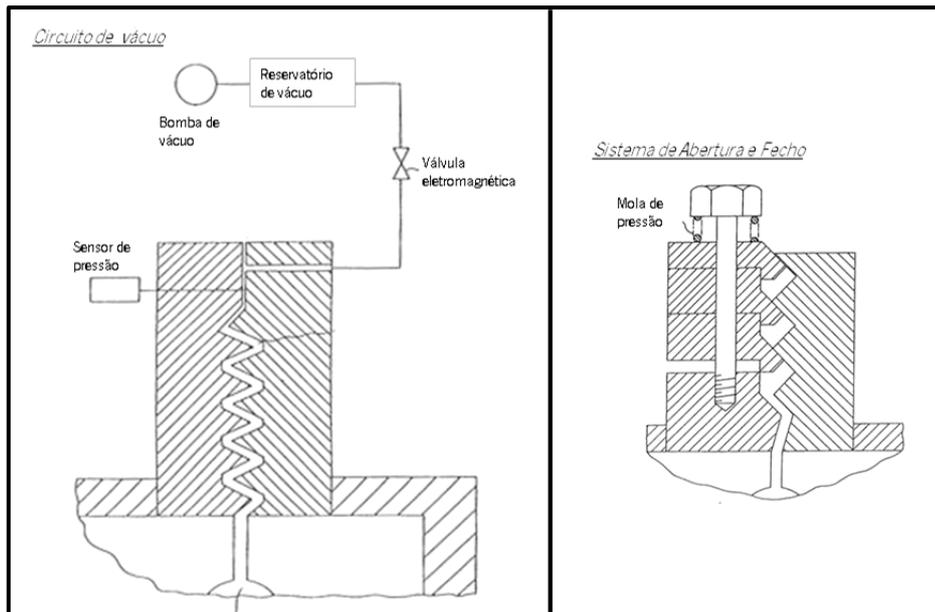


Figura 16: Sistema de acoplamento de vácuo pela Ngk; adaptado [21]

Este sistema usa um parafuso que ao ser apertado permite a abertura do sistema para a remoção de ar da moldação, a mola garante que as placas se mantenham na posição mais baixa evitando que fiquem soltas e descolem mais facilmente da placa oposta.

Na *Pusan National University* foram realizados ensaios que visavam verificar as diferenças entre o processo atmosférico e o processo assistido por vácuo em ligas de Al-Si. O grupo de estudo chegou à conclusão que havia uma redução significativa de porosidades (Figura 17A), melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na capacidade de preencher peças de espessura reduzida ($\approx 0.8\text{mm}$) [22]. No processo tradicional aparecem fissuras e porosidades conforme se pode constatar na Figura 17B.

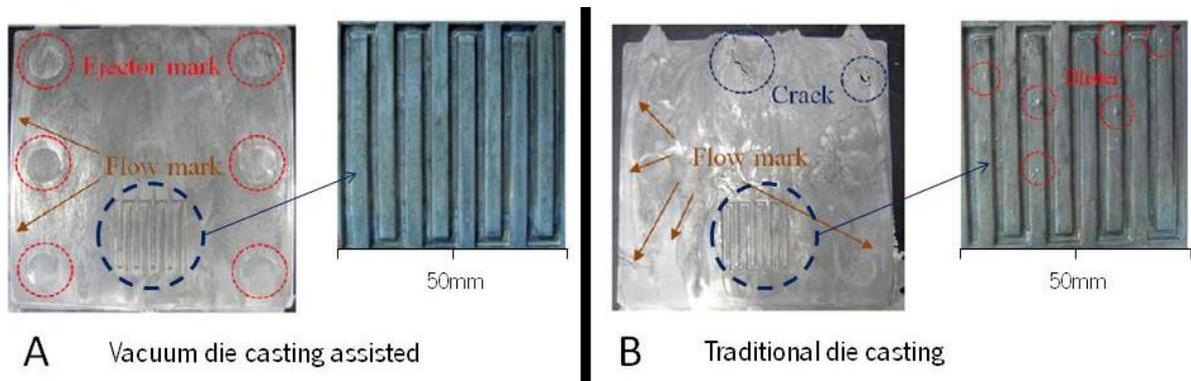


Figura 17: Resultados dos ensaios realizados, adaptado [22].

4. Escolha do processo

A escolha do processo a ser usado para a obtenção das varetas de soldadura tem que respeitar requisitos exigidos e desejados. Apesar da simplicidade do trabalho não ser um requisito exigido, a simplicidade do pedido não exigiu muitos requisitos.

Os requisitos exigidos impõe apenas duas condições, que ao não serem cumpridas inviabilizam as peças que se pretendem obter:

- i) Garantir a composição química da vareta, que é imperativo para garantir o mínimo de interferência acústica ao ser adicionado aos sinos através de um processo de soldadura.
- ii) As dimensões das varetas, devido à prática da tecnologia de soldadura.

Os requisitos desejados podem acrescentar mais-valia ao processo e alguns permitem definir a escolha em processos similares. Na Tabela 3 estão identificados os requisitos.

Tabela 3: Requisitos

Exigidos	Composição química
	Atravancamento (vareta obtida)
Desejados	Baixo custo.
	Simplicidade de utilização
	Acessibilidade dos materiais
	Funcionamento
	Aproveitar os recursos de uma fundição
	Implementação

Os atributos da peça, representados na Tabela 5, são essencialmente aqueles que são exigidos no material de adição para um processo de soldadura TIG.

Tabela 4: Atributos da peça

Composição química (%)	Cu80Sn20
Atravancamento (mm)	150xø3
Custo	Não definido
Funcionamento	Possibilidade de utilização pontual
Implementação	Não definido

Definidos os requisitos e os atributos, a discussão recaiu sobre o processo a utilizar. Dessa discussão resultaram quatro hipóteses que estão identificadas na Tabela 5.

Tabela 5: Mapa morfológico

	Processo de obtenção de varetas
Opção A	Coquilha com selagem cerâmica
Opção B	Coquilha com selagem através de O'Ring
Opção C	Eletrodeposição
Opção D	Fundição injetada

Para criar a tabela de valor (Tabela 6) foi atribuída uma ponderação de 2 para os requisitos exigidos e de 1 para os desejados.

Tabela 6: Tabela de valor

	*		Coquilha com selagem cerâmica	Coquilha com selagem através de O'Ring	Eletrodeposição	Fundição injetada	
Exigidos	2	Composição química	3 (6)	3 (6)	1 (2)	3 (6)	10 (20)
	2	Atravancamento (vareta obtida)	2 (4)	2 (4)	4 (8)	2 (4)	10 (20)
Desejados	1	Baixo custo.	2	2	5	1	10
	1	Simplicidade de utilização	2	4	3	1	10
	1	Acessibilidade dos materiais	3	3	3	1	10
	1	Funcionamento	2	5	2	1	10
	1	Aproveitar os recursos de uma fundição	4	4	1	1	10
	1	Implementação	2	5	2	1	10
		TOTAL	25	33	26	16	100

*Ponderação

No final a decisão recaiu na opção B, ainda assim é de salientar que as opções A e C também são válidas. A opção C acaba por ser penalizada pelos requisitos desejados.

4.1. Processo selecionado

Após a triagem das propostas apresentadas, a escolha caiu na opção B que respeita a maior parte dos requisitos pretendidos. As opções A e B não eram significativamente diferentes, mas a B garante uma melhor selagem da moldação e anula a operação de limpeza entre vazamentos.

Assumindo que as empresas interessadas neste negócio são empresas de fundição, era importante aproveitar a fusão de sinos para recolher metal líquido para realizar os vazamentos. Essa opção permite obter de imediato varetas com uma constituição química idêntica aos sinos que estão a ser reproduzidos. Como a quantidade a produzir não é elevada o equipamento necessário é compacto. A utilização de um circuito de vácuo permite atenuar as características pouco fluídas do bronze, que em circunstâncias normais não permitem preencher secções finas.

Alguns dos sinos a recuperar são seculares, nessa época não havia o cuidado com a qualidade do material usado e as percentagens dos diferentes metais na liga não era respeitado. Este fator obriga a utilização de um forno de dimensões reduzidas para afinar o material a fundir, para que este seja o mais próximo possível da matriz do sino a restaurar.

Finalmente, a seleção de um equipamento compacto tem a ver com o facto de os vazamentos serem de pequenas séries e cada um deles apenas necessitar de uma pequena quantidade de material.

4.2. Idealização e modelação da opção B

Assim que se definiu o processo a utilizar foram idealizados, esboçados e modelados novos conceitos construir a moldação. De seguida encontram-se algumas dessas alternativas.

Alternativa 1

A primeira abordagem à moldação acrescentou alguns conceitos ao equipamento desenvolvido na UC de Integradora VIII do MIEMEC. A moldação representada na Figura 2 (Pág. 3) consiste num conjunto de 7 componentes de base:

- 2 – Meias moldações (interiores);
- 2 – Meias câmaras (exteriores);
- 1 – *O'ring*;
- 1 – Chapa de estanho/cobre;
- 1 – Ligação ao sistema de vácuo.

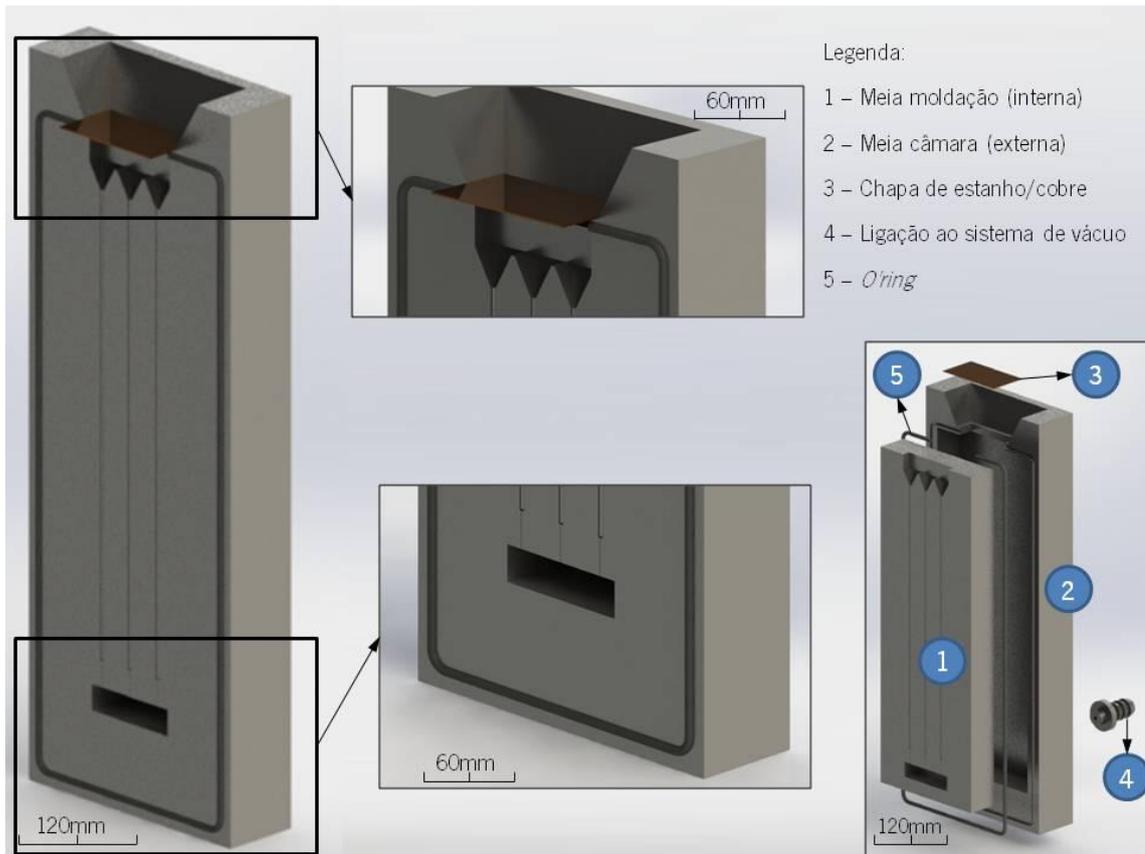


Figura 18: Modelação em câmara fechada com vedação no topo com chapa de estanho/cobre

Durante o desenvolvimento da coquilha em Integradora VIII, foram previstas algumas dificuldades, como a integridade do *O'ring* durante o pré-aquecimento, o elevado peso da moldação e a vedação da cavidade interna para garantir a existência de vácuo. A solução encontrada para a resolução dos problemas foi dividir a moldação em partes. Assim, a solução apresentada na Figura 18 tinha os seguintes propósitos:

- Moldação (interior) – Esta opção permitia aquecer uma pequena parte da moldação reduzindo o seu peso e a redução do tempo de aquecimento garantia uma vantagem adicional.
- Câmara (exterior) – A câmara onde é inserida a moldação têm duas funções; selar o sistema e ter uma temperatura de baixa de trabalho para garantir a integridade do *O'ring*.
- Chapa de estanho/cobre – A chapa serve para evitar as entradas de ar pela zona de vazamento.

Apesar de a alternativa apresentada incluir algumas soluções interessantes, havia uma lacuna que possibilitava a entrada de ar na moldação. O *O'ring* tinha uma abertura na zona de vazamento.

Alternativa 2

Uma das soluções idealizada, mais complexa, pretendia resolver a lacuna encontrada na primeira alternativa, reduzir o peso da moldação interior e a espessura de aço a maquinar. Esta solução introduziu pela primeira vez uma câmara de baixa pressão com três secções, dois *O'rings* e uma bacia de vazamento bipartida.

Na Figura 19 são visíveis as alterações, onde se destacam as seguintes:

- Moldação (interna) – É visível a remoção de material na parte inferior, que serve para reduzir o seu peso.
- Câmara de baixa pressão – É um conjunto que serve para manter um ambiente de baixa pressão à volta da moldação.
- Bacia de vazamento – A bacia, para além da sua função principal, serve para prender a chapa de estanho/cobre.

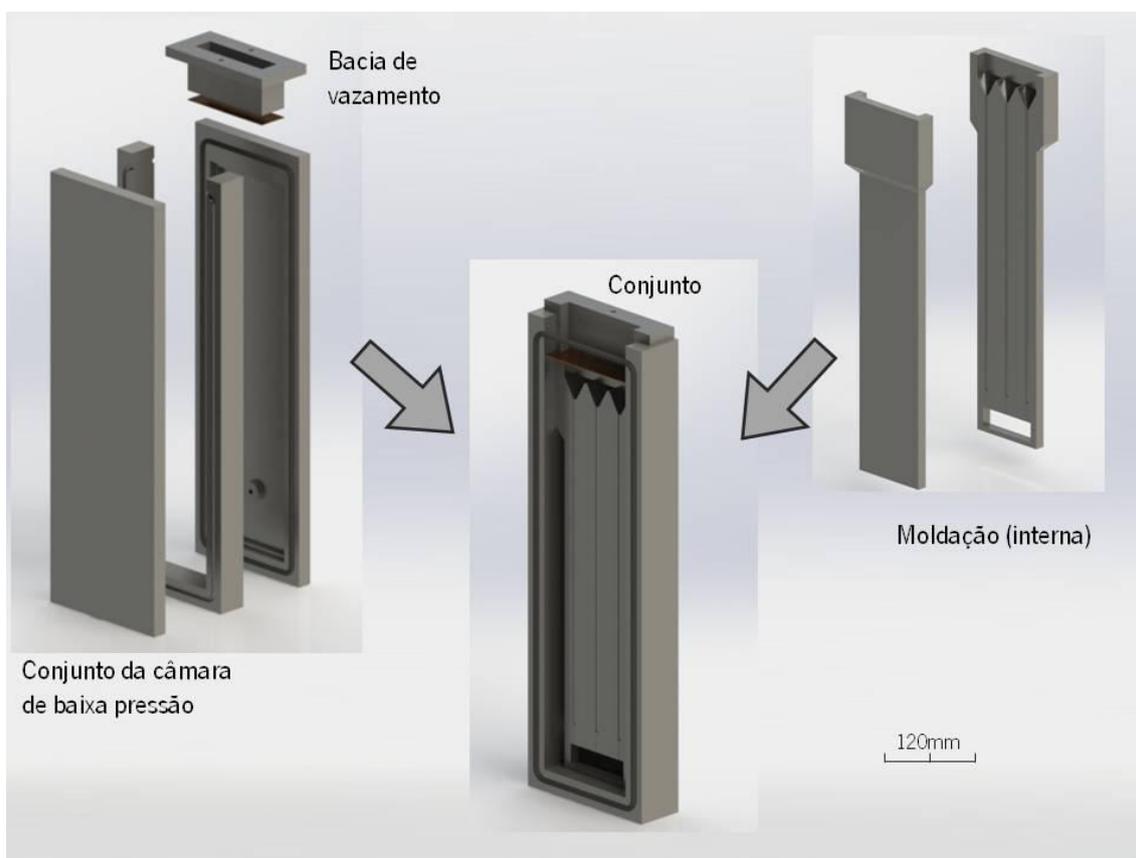


Figura 19: Moldação em câmara de baixa pressão.

Esta solução acabou por ser posta de lado, devido à sua complexidade e ao contacto da bacia com a vedação. Ainda assim, é de salientar a opção encontrada para retirar a bacia na zona de contacto do *O'ring* dentro desta alternativa (Figura 20).

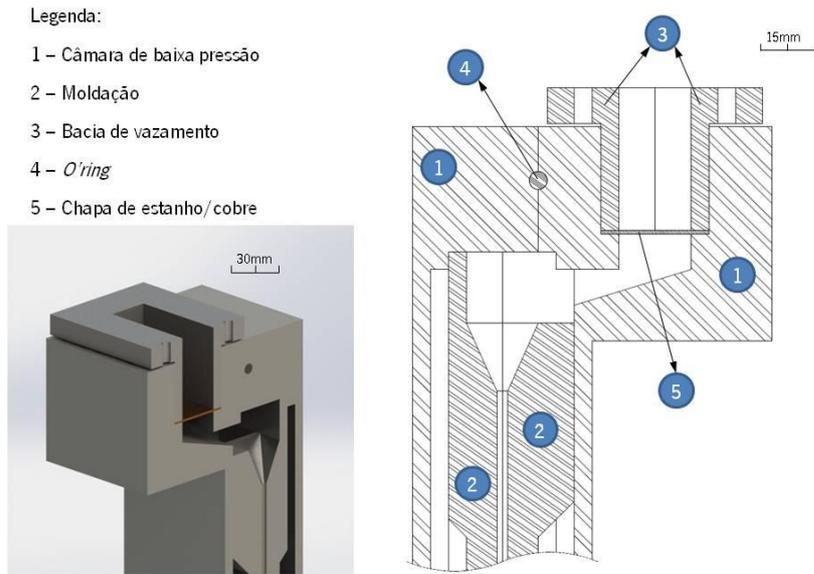


Figura 20: Moldação com bacia descentrada

Alternativa 3

Dentro das soluções mais relevantes, a terceira alternativa era uma aposta clara na câmara de baixa pressão. Neste campo foram construídos vários esboços, dos quais se destacam os seguintes (Figura 21):

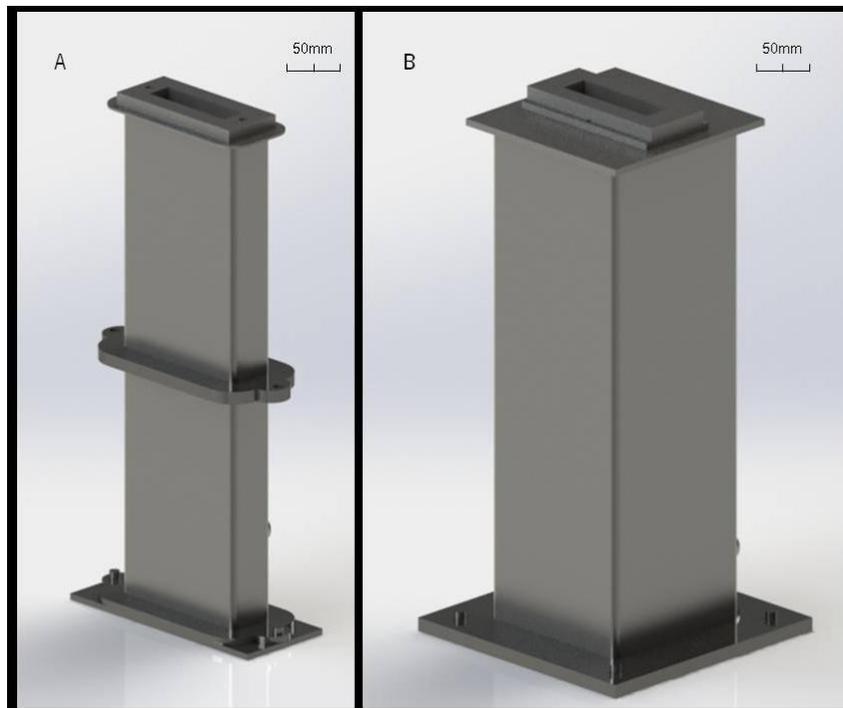


Figura 21: Coquilha em câmara de baixa pressão. (A – Câmara bipartida; B – Câmara integral)

A novidade principal neste conceito é a utilização de tubos de aço (Norma - EN 10305-5), que servem de câmara de baixa pressão. A grande vantagem passa pela facilidade em arranjar este produto a preços acessíveis. Entre as opções apresentadas existem pequenas diferenças de manuseamento.

- Na opção A da Figura 21, a metade da câmara inferior permanece fixa enquanto a coquilha é colocada no interior e só depois é colocada a parte superior.
- Na opção B da Figura 21, primeiro é fixada a coquilha na base, e a câmara é colocada como se tratasse de uma campânula. Este conceito prevê que seja feita normalização, que permita utilizar diferentes coquilhas para a mesma câmara.

As derradeiras atenções foram focadas na Opção B, onde se conseguiu desenvolver algumas ideias válidas a serem exploradas em futuros equipamentos. Ficam em baixo alguns desses exemplos:

- Chapa de alumínio na base da bacia;
- Câmara de baixa pressão universal;
- Materiais usados na construção da câmara;

A Figura 22 mostra alguns dos pormenores inovadores existentes na conceção da nova câmara de baixa pressão e os desenhos referentes ao modelo estão no Anexo VII.

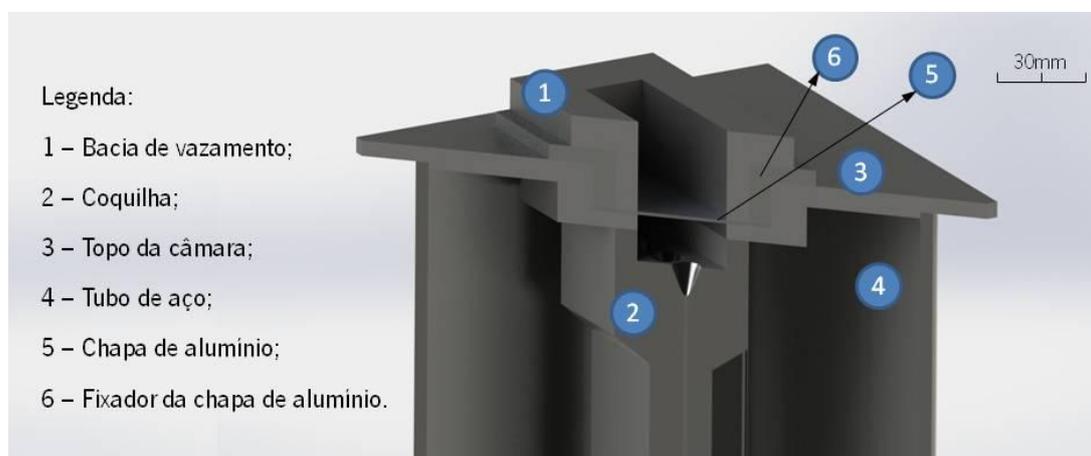


Figura 22: Coquilha em câmara de baixa pressão (corte da parte superior da opção B)

4.3. Rejeições

Após uma análise ponderada sobre as alternativas propostas e com base nos requisitos exigidos, foram eliminadas três das opções selecionadas, de seguida estão mencionadas as principais justificações para a sua rejeição.

Opção A:

A coquilha com selagem cerâmica apenas difere da opção escolhida no tipo de selagem para a evitar entradas de ar no seu interior.

O processo consiste na utilização de um vedante cerâmico na união das moldações. Este tipo de material é muito usado nas lareiras para a fixação de alguns componentes ou na sua reparação. Este produto vem em recipientes idênticos aos de silicone o que torna a sua aplicação simples, rápida e suporta temperaturas até 1200°C [23]. A sua compra pode ser feita em muitas das lojas de materiais de construção, bricolagem e jardim, sendo o seu custo acessível.



Figura 23: Vedante Refratário [23]

A rejeição deste processo incide sobretudo em dois pontos fundamentais, o primeiro reside no facto de ser um produto que após a sua secagem fica poroso permitindo a entrada de ar na moldação, o segundo consiste em ter de efetuar a sua remoção após cada utilização.

Opção C:

A eletrodeposição é um processo industrial que recorre à eletrólise de um metal condutor para cobrir um outro metal. Há uma migração de partículas carregadas com uma determinada carga elétrica provenientes de uma solução aquosa iónica eletrolítica (banho) através de corrente elétrica para a peça a revestir. Esta solução aquosa é composta por sais com iões do metal a depositar. A peça final possui um filme fino de partículas que previnem a oxidação e corrosão desta.

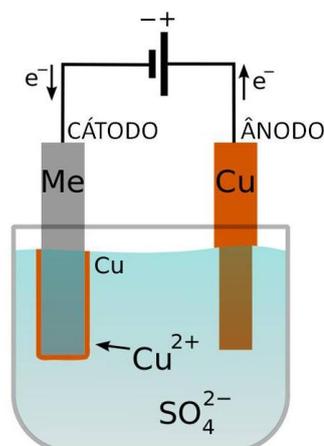


Figura 24: Esquema de eletrodeposição de cobre num metal (Me)

A ideia da utilização deste processo não seria criar um revestimento protetor, mas construir uma vareta com alma e revestimento de materiais distintos. Esta configuração parte do pressuposto usado nos elétrodos revestidos, onde existe uma alma com o material que se pretende soldar e o revestimento que cria uma atmosfera protetora na zona de contacto. A reformulação desta filosofia passa por criar uma combinação de estanho e cobre no eléctrodo (Figura 25), que seria fundida em simultâneo criando a combinação química pretendida.

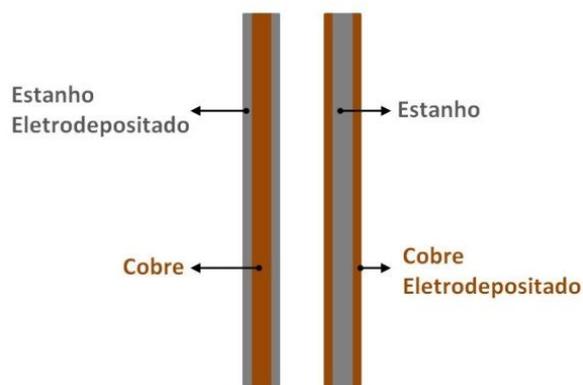


Figura 25: Representação da configuração do eléctrodo

O processo é de fácil implementação, permite obter varetas compridas e jogar com a espessura pretendida de revestimento através da velocidade deposição. Porém, existe uma forte probabilidade do estanho¹ fundir antes do cobre², que resultaria numa alteração de forma do eléctrodo (Figura 26) e conseqüentes variações na constituição do cordão de soldadura.

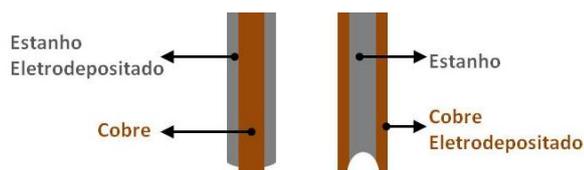


Figura 26: Deformação do eléctrodo durante o processo de soldadura

Opção D:

A fundição injetada é uma tecnologia usada para produção de peças em série. Os moldes são permanentes e fabricados em aço. Este processo consiste num equipamento que tem uma conduta onde é colocado o metal, sendo empurrado por um pistão que encaminha o fluido para o molde mantendo a pressão para evitar a criação de bolsas de ar. Os moldes possuem pequenos canais que

¹ Temperatura de fusão do estanho é $\approx 231,93^{\circ}\text{C}$

² Temperatura de fusão do cobre é $\approx 1.084,62^{\circ}\text{C}$

permitem a saída do ar para impedir a formação de peças defeituosas pela criação de bolhas. Esta tecnologia está assente em dois grandes métodos; câmara fria e câmara quente, diferindo essencialmente na forma como o metal é tratado e alimentado até ao canal de alimentação.

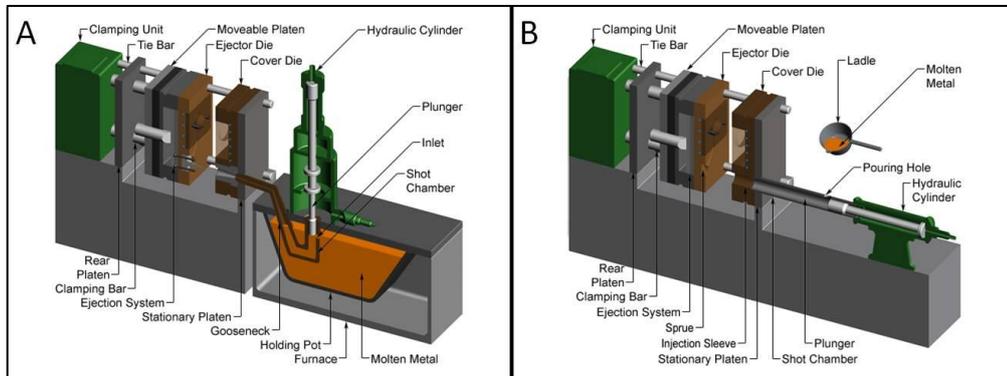


Figura 27: Equipamentos de Fundição Injetada. A) Câmara quente; B) Câmara fria [24]

A fundição injetada é um processo que garante peças com bons pormenores de acabamento, repetibilidade, reduzido número de defeitos e uma elevada cadência de produção. O custo de implementação e a reduzida quantidade de peças pretendidas retiram o equipamento das opções a considerar.

5. Projeto e construção do vazamento assistido por vácuo

5.1. Circuito de Vácuo

O circuito de vácuo apesar de ter um dimensionamento simples é fundamental que garanta as seguintes funções:

- Remoção de ar da moldação;
Esta é a função para a qual o circuito foi idealizado.
- Impeça a contaminação da bomba com resíduos;
Durante o vazamento é muito provável que se soltem partículas de refratário e pequenas partículas de bronze sejam aspiradas durante o vazamento.
- Possibilidade de controlar a depressão na moldação;
Durante a fase de estudo é importante saber até que ponto o vácuo é benéfico para o processo. Uma das hipóteses colocadas foi, saber quando o vácuo provoca a separação do metal durante o vazamento.
- Ter um vacuómetro;
Para além de controlar a pressão é importante ter a informação da pressão de trabalho.
- Sistema de segurança para proteção do equipamento.
A fundição de bronze é um processo que trabalha com temperaturas superiores a 1000°C, manter o circuito e sobretudo a bomba protegida dos gases oriundos do metal é imperativo.
- Equipamento de baixo-custo;
O custo do equipamento tem de ser baixo, uma vez que é um dos requisitos do projeto.
- Fácil montagem, manutenção, utilização e arrumação;
Numa fase inicial o equipamento será usado ocasionalmente e para evitar perdas de tempo é essencial que toda a sua operacionalidade seja rápida e intuitiva.

Definidos os principais critérios para a construção do circuito de vácuo, elaborou-se um esquema para identificar os componentes necessários e qual a sua disposição (Figura 28).

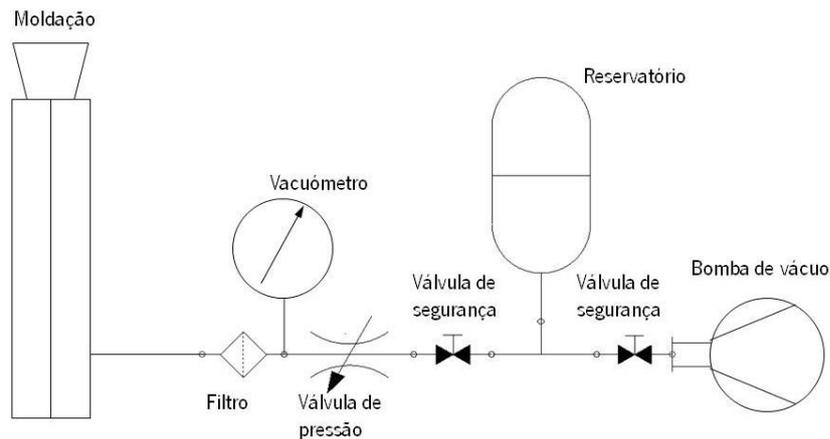


Figura 28: Esquema do circuito de vácuo

Após a seleção dos componentes a usar no circuito de vácuo foi recolhido material necessário nos diferentes laboratórios do Departamento de Mecânica. No Anexo I. encontra-se a lista e características dos equipamentos utilizados durante os ensaios práticos.

5.2. Projeto da coquilha

Conforme previamente enunciado, a coquilha utilizada foi idealizada na Unidade Curricular de Integradora V. No ato de dimensionar uma moldação é necessário verificar se a moldação respeita algumas das regras fundamentais [1].

- i. Liga:
O bronze é uma liga de cobre e o seu ponto de fusão é relativamente elevado, o único problema é a sua elevada viscosidade.
- ii. Eixo de rotação:
Apesar de não ter um eixo de rotação físico na coquilha, ao manter a moldação na sua posição vertical é possível idealizar um eixo na aresta vertical externa das faces interiores.
- iii. Pinos de alinhamento:
No equipamento utilizado esta função é efetuada pelos parafusos de fecho.
- iv. Ângulos de saída:
Como as peças a vazar são cilíndricas, os ângulos de saída estão salvaguardados.
- v. Alternância de espessura:
Não é recomendável a redução/aumento de secção nas peças, esta situação também está salvaguardada, uma vez que as varetas têm secção constante.

- vi. Número de peças por molde:
Este fator não é relevante para o trabalho, mas na evolução para a produção pode ser necessário rentabilizar as moldações produzindo mais varetas por vazamento.
- vii. Solidificação progressiva:
A solidificação deve ser progressiva desde a extremidade até à fonte de alimentação. Nas peças a obter a alimentação é feita diretamente pela bacia de vazamento.
- viii. Ventilação:
A coquilha utilizada foi idealizada para ser hermética, logo não há ventilação. Um dos objetivos de criar um ambiente de baixa pressão na cavidade é reduzir a quantidade de gases libertados.
- ix. Sistema de gitagem:
Tendo em conta a simplicidade das peças e da moldação, não é necessário um sistema de gitagem muito complexo, basicamente é constituído por bacia de vazamento e canal de descida, neste caso são as próprias varetas. Devido à reduzida dimensão da peça, o sistema não tem distribuições, ataques e alimentador.

Dimensionamento da coquilha

As diferenças de dimensionamento de uma moldação metálica para uma moldação de areia não são muito significativas. Nas moldações metálicas tem que se garantir a saída de gases em contrapartida não é necessário ter os cuidados com a compactação da areia.

No dimensionamento de qualquer processo de fundição há duas variações a ter em conta:

- Rentabilizar o material vazado;

A ideia desta filosofia prende-se ao facto de na relação de peça limpa/peça + gitos obter um resultado próximo de 1, ou seja, quanto menor o sistema de gitagem menor o desperdício.

- Rentabilizar a moldação.

A rentabilização da moldação tem como objetivo produzir o máximo de peças por ciclo, neste caso aumenta-se o sistema de gitagem para garantir o máximo de peças sãs e o e a relação passa a ser, peças sãs/metal vazado.

O processo em estudo não respeita nenhuma das condições acima descritas, aproxima-se da rentabilização da moldação, uma vez que se pretende obter o máximo de peças sãs independentemente do número de peças.

A base de projeto de fundição, cujo vazamento seja feito por gravidade, deve passar obrigatoriamente por três expressões; o teorema de *Bernoulli*, a lei da continuidade do caudal e o número de *Reynolds*.

- *Teorema de Bernoulli*;

$$\left(h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} \right) = h_p$$

Este teorema serve para definir algumas das variáveis do processo, como a altura metalostática, velocidade e pressão em vários pontos do trajeto.

No caso da bacia tendo em conta que o vazamento é atmosférico e a entrada o caudal não ocupa toda a largura, pode ser usada a formula simplificada onde se assume que no topo $v_1=0$; $p_1=p_{atm}=p_2$, então fica:

$$h_1 - \frac{v_2^2}{2g} = h_p$$

- *Equação da continuidade do caudal*;

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Esta equação indica que o volume deslocado é sempre igual e com variações na secção transversal é possível controlar a velocidade do metal líquido.

- *Número de Reynolds*;

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

O escoamento em fundição tem que ser o menos turbulento possível, sabendo os dados físicos do material vazado, juntamente com os obtidos pelas expressões anteriores sabe-se o tipo de escoamento. O resultado dever ser o mais baixo possível, preferencialmente abaixo de 2000.

Dimensionamento da bacia de vazamento

Existem dois tipos de bacias de vazamento, as sortilhas e em funil Figura 29.



Figura 29: Tipos de bacia de vazamento; A) Funil B) Sortilha [25]

Existem vários tipos de sortilhas, cujo objetivos passam para regular o caudal, reduzir a pressão metalostática, reter ou filtrar escória, impedir a erosão do refratário no canal de descida pelo vazamento direto. O funil garante um vazamento mais direto, rápido e reduz o tempo de vazamento.

O funil foi o tipo de bacia escolhido pelo facto do canal de descida ser estreito (3mm) o que reduz drasticamente a velocidade do metal. As principais preocupações foram garantir a continuidade de caudal à entrada do canal de descida e metal suficiente para encher a vareta ($\approx 706.8\text{mm}^3$). Apesar de não fazer parte do projeto inicial, a configuração em funil permite a introdução de uma chapa de estanho na base, garantindo dessa forma a selagem da coquilha.

A Figura 30 representa o desenho em corte da bacia de vazamento. Esta peça do equipamento permite acomodar o bronze necessário para a produção da vareta, tem a uma inclinação de 60° para atenuar o efeito da viscosidade do bronze e pode ser fixa à coquilha.

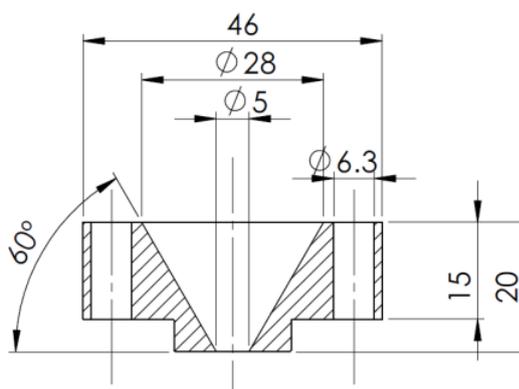


Figura 30: Desenho em corte da bacia de vazamento

Canal de descida

A construção de um equipamento simples passou por assumir que a vareta seria obtida logo no canal de descida. Esta foi a forma encontrada para evitar desperdício de bronze e a simplificação máxima da coquilha, tornando mais compacta e de reduzida maquinagem.

Este procedimento contraria o normal dimensionamento, uma vez que o canal tem uma secção constante que pode provocar alguma turbulência devido à subpressão provocada pela descida do metal, conforme se pode observar na Figura 31.

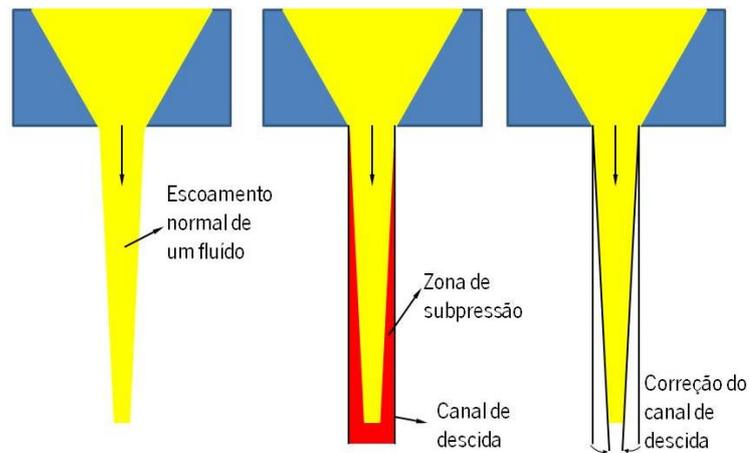


Figura 31: Escoamento de líquidos e correção do canal de descida

No entanto há duas variáveis que podem tornar imprevisível o comportamento acima descrito.

- Sistema de vácuo;
Este equipamento pode provocar um agravamento da zona de subpressão adicionada ao diminuir ainda mais a pressão.
- Viscosidade;
Esta característica do bronze já é conhecida, tornando o canal de descida cilíndrico um risco aceitável.

Canal de vácuo

O canal de vácuo é uma novidade no processo de fundição em estudo, o seu dimensionamento foi baseada nas opções usadas pela fundição injetada. A Figura 32 mostra zona de extração de ar, que teve em consideração os seguintes parâmetros:

- Localização;
O canal está na base da vareta, no local mais distante da bacia onde a temperatura é mais baixa durante o vazamento.
- Diâmetro do canal;
O bronze ao chegar à base da vareta tem uma elevada viscosidade devido ao arrefecimento que sofreu durante o canal de descida, reduzindo a probabilidade de este entrar no canal que tem apenas 0,5mm.

- Comprimento do canal;

O canal tem uma extensão de 18mm e garante uma proteção adicional ao sistema de vácuo. Caso o bronze entre neste canal, este solidifica instantaneamente devido ao elevando coeficiente de condução térmico do aço da moldação.

- Caixa de vácuo;

A caixa de vácuo é o espaço que permite ligar a cavidade moldante ao exterior da coquilha onde é acoplado o sistema de vácuo.

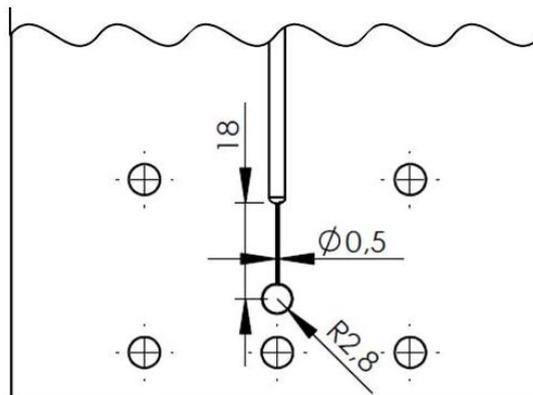


Figura 32: Pormenor do canal de vácuo

Nota: Este comprimento e diâmetro revelaram-se suficientes, uma vez que o enchimento máximo deste canal foi de 12mm, não se registando resíduos de bronze na caixa de vácuo.

5.3. Dimensionamento da coquilha de 3 varetas

A alteração da coquilha para a versão de três varetas apenas necessitou de quatro modificações de maquinagem; uma nova bacia de vazamento, as novas varetas, os rasgos para o sistema de vácuo e o alargamento do encaixe para a nova bacia de vazamento.

Nova bacia de vazamento

A nova bacia de vazamento foi desenhada para comportar o bronze necessário para a operação, garantir uma ajuda adicional com o peso metalostático e proporcionar uma segurança adicional impedindo a projeção de bronze durante o vazamento, conforme se pode verificar na Figura 33.

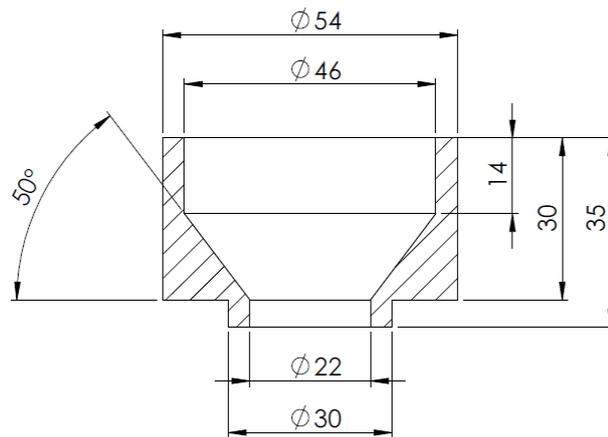


Figura 33: Desenho em corte da nova bacia de vazamento

Maquinagem do encaixe para a nova bacia

A maquinagem do encaixe da bacia tem uma folga de 2mm, porque durante alguns ensaios práticos, a bacia de vazamento era transferida do forno de pré-aquecimento para o forno de fusão onde se mantinha durante 5min. Esta situação provocava uma elevada dilatação que foi compensada pela folga. Na Figura 34 é possível constatar essa alteração.

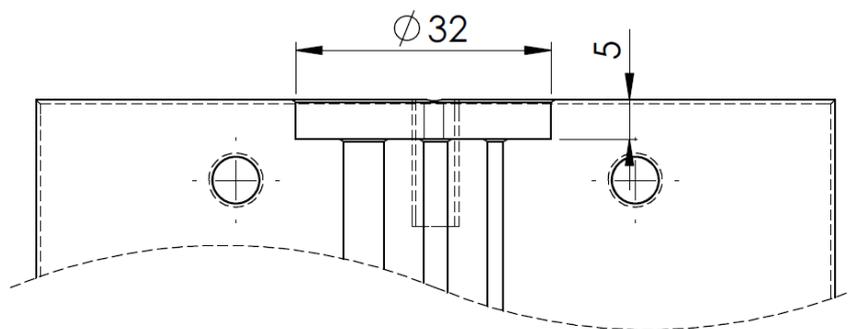


Figura 34: Desenho de pormenor da maquinagem do encaixe da bacia de vazamento

Maquinagem das novas varetas

Na Figura 35 estão em pormenor a cotagem das distâncias entre as varetas, mantendo no centro a vareta original de 3mm.

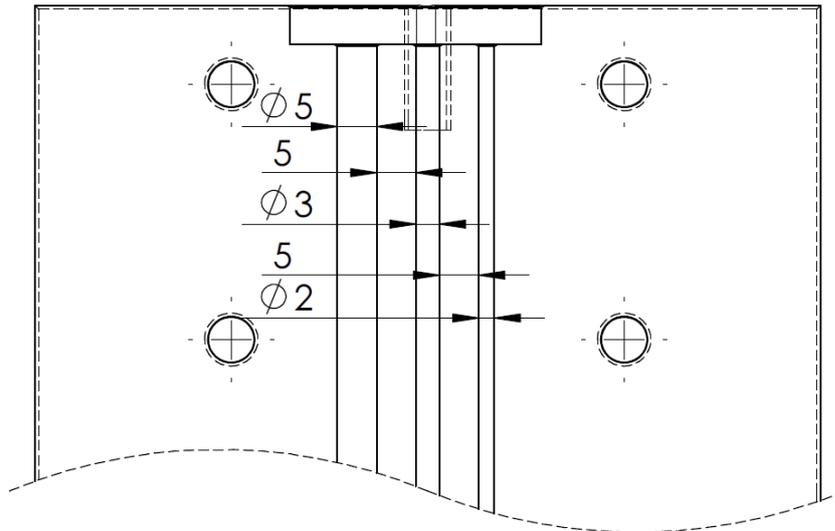


Figura 35: Desenho de pormenor da maquinação das varetas de 2 e 5mm

A opção de utilizar um espaço de 5mm entre as varetas, foi para aproveitar a condução térmica durante o vazamento para garantir um melhor preenchimento e manter uma distância de segurança para evitar a deformação o equipamento.

Maquinação das saídas para o vácuo

Por fim era preciso fazer novos rasgos para o escoamento de ar para o sistema de vácuo, esta operação foi realizada a dois tempos; primeiro abriram-se os rasgos, mas a insuficiente retirada de ar das novas obrigou a necessidade de se abrir uma caixa com uma profundidade de 5mm, que permitisse um direcionamento mais eficaz. A Figura 36 mostra as duas soluções idealizadas e a respetiva alteração.

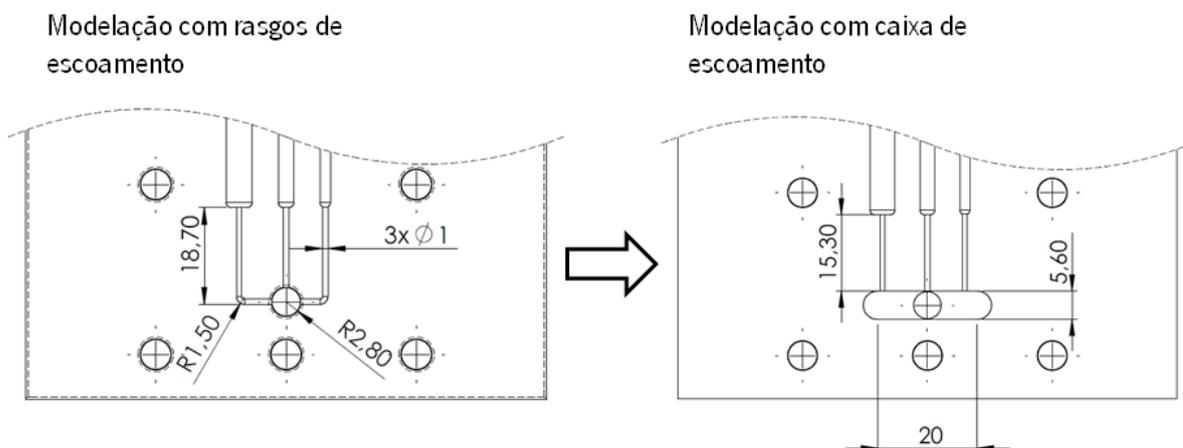


Figura 36: Desenhos de pormenor dos sistemas de escoamento de ar

5.4. Preparação e procedimentos

Ao longo do desenvolvimento do projeto foram estabelecidos alguns procedimentos, que foram ajustados à medida que se iam desenrolando os ensaios práticos. Desde a preparação até ao cortar das varetas da bacia há quatro etapas gerais; preparação, aquecimento, vazamento e desmoldação. Porém, o protocolo de segurança é transversal a todas as etapas e foram tidos em conta os elevados riscos associados à tecnologia de fundição, que estão identificados na Tabela 33 do Anexo II. e as respetivas recomendações sugeridas no mesmo Anexo.

A Tabela 7 identifica os equipamentos de segurança que se encontram nos Laboratórios de Tratamentos Térmicos e de Fundição.

Tabela 7: Equipamentos de segurança dos Laboratórios de Tratamentos Térmicos e Fundição.

Segurança ativa	Segurança passiva
<ul style="list-style-type: none">– Luvas;– Tenazes;– Viseira/óculos;– Avental;– Mascaras de gás;– Ventiladores;– Botas de segurança;	<ul style="list-style-type: none">– Extintores;– Pontos de água;– Corte de energia de emergência;– Sairas de emergência;– Extrator de elevado caudal;– Recipientes com areia.

Depois de garantidas as condições de segurança, seguem-se as etapas de trabalho:

Preparação

Esta é a etapa mais complexa no que toca aos procedimentos, porque há duas abordagens a ter em conta. A primeira situação é quando o processo está inativo e é preciso arrancar, a segunda situação é quando está em cadência de produção.

Quando se está numa posição de arranque é necessário garantir que todo o sistema está calibrado para realizar o primeiro vazamento. Tendo em conta que os fornos precisam de tempo para atingir as temperaturas necessárias, devem ser os primeiros a ser preparados e depois o sistema de vácuo. Seguindo estes conceitos seguem-se os passos recomendados para rentabilizar o tempo de trabalho.

1. Preparação da tinta refratária. Para que o produto atinja a viscosidade desejada este deve ser preparado de véspera (12h antes do início do processo), conforme recomendado pelo distribuidor do produto e que se encontra no documento reproduzido no Anexo III.
2. Ligar o forno de fusão até atingir a temperatura pretendida. Este deve ser o primeiro equipamento a colocar em funcionamento por ser o que mais tempo demora a atingir a temperatura pretendida. Atingida a temperatura coloca-se o bronze no forno.

Por exemplo: Para atingir a temperatura de 1100°C o forno demora aproximadamente 120 minutos, o bronze deve ser colocado no forno ao fim de 100 minutos do início do aquecimento do forno, para um volume de 200cm³ e com uma secção não superior a 1cm.

3. Preparação da coquilha. A preparação da coquilha consiste em limpar as faces internas para que estas fiquem bem unidas. Depois coloca-se a tinta refratária nas cavidades e na bacia com um pincel, não podendo ficar qualquer resíduo nas faces internas ou na base da bacia (caso fique algum refratário na face interna da coquilha, basta usar palha de aço e passar sem friccionar). Por fim a coquilha é aparafusada, não é necessária muita força, porque no primeiro aquecimento a dilatação do metal garante um aperto adicional.

Nota: Caso não seja possível preparar a moldação de véspera, esta deve ser preparada logo após ligar o forno de fusão e pode ser colocado dentro do forno de pré-aquecimento enquanto este está a aquecer.

4. Ligar o forno de pré-aquecimento da coquilha. O forno tem um aquecimento relativamente rápido, no entanto, devido à espessura da coquilha é necessário dar o tempo necessário para que esta atinja a temperatura pretendida.

Por exemplo: A coquilha para atingir uma temperatura de 250°C são necessários 60 minutos, no entanto não há qualquer contraindicação em manter a coquilha por mais tempo no forno.

5. Preparação do sistema de vácuo. O sistema de vácuo tem uniões que permitem uma rápida montagem sendo necessário menos de 10 minutos para ficar operacional. Para regular a pressão desejada basta utilizar a válvula reguladora e verificar no vacuómetro. Caso se pretenda utilizar a pressão mínima do sistema, basta manter a válvula reguladora na posição de totalmente aberta.

Para simplificar a interpretação do arranque do sistema foi construído um diagrama apresentado na Figura 37.

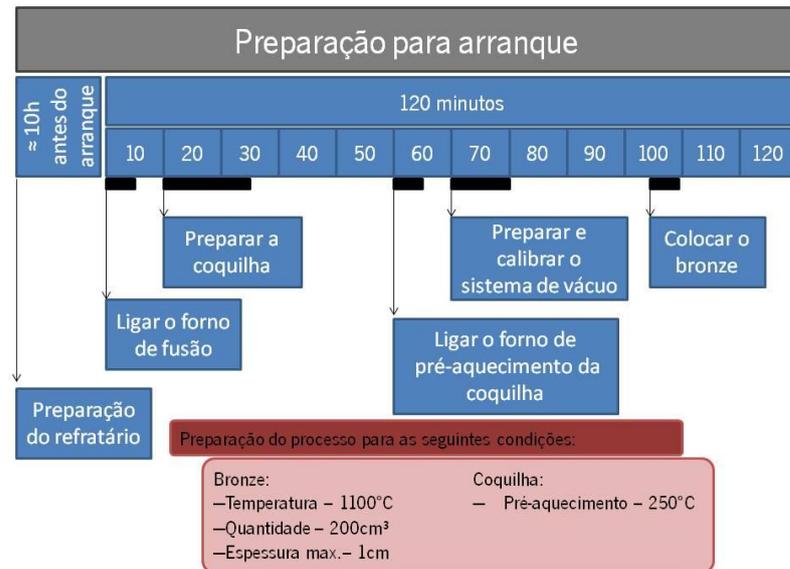


Figura 37: Diagrama de preparação para arranque

As barras a negro representam o tempo efetivo que cada tarefa demora. Ao analisar a barras é possível verificar a existência de tempos mortos, o que deixa de acontecer após o processo estar em produção contínua, devido à redução ou mesmo a anulação de algumas operações.

Assim que o processo está em produção contínua passa a sofrer alterações no planeamento de tarefas. Aproveitando a sequência de arranque, as alterações a efetuar são as seguintes:

1. Preparação da pintura refratária. Neste caso não há necessidade em preparar nova solução, basta monitorizar a viscosidade e acrescentar água para repor a que vai evaporando ao longo do dia. É importante frisar que se deve preparar a quantidade necessária de véspera para o número de ciclos desejados.
2. Forno de fusão nesta fase já está à temperatura desejada, logo apenas é necessário aguardar os 20 minutos para a fusão do bronze.
3. Preparação da coquilha. Esta tarefa é aquela que dita a cadência a partir do momento que se está em ritmo de produção, uma vez que o número de tarefas de mantem. Nesta fase o aperto da coquilha requer maior força, por já se encontrar próximo da temperatura de trabalho.
4. O Forno de pré-aquecimento da coquilha, nesta fase, também se encontra à temperatura de trabalho, bastando 15 minutos para recolocar a coquilha novamente à temperatura desejada.

5. No sistema de vácuo é necessário fazer a verificação da pressão e, caso necessário, ajustar a partir da válvula reguladora.

Na Figura 38 estão definidas as tarefas para o processo em cadência de trabalho.

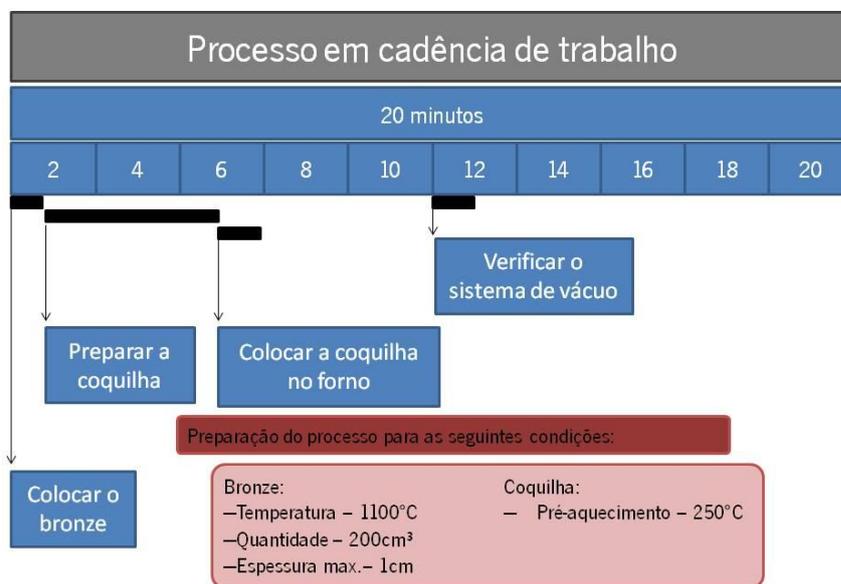


Figura 38: Diagrama de preparação para cadência de trabalho

Nota: É importante frisar, que os tempos verificados a nível experimental estão condicionados pelo processo manual de preparação da coquilha.

Vazamento

Esta etapa é a mais simples e no que toca às tarefas, em contrapartida também é aquela que tem mais riscos de acidente associados. Logo é imperativo que todas as medidas de segurança sejam tomadas e respeitar as recomendações que constam no Anexo II.

A ordem de tarefas é substancialmente inferior à etapa anterior. Apesar de ser possível ser realizada por um único operador, recomenda-se a realização por dois por motivos de segurança e aproveitamento de recursos.

1. Retirar a coquilha do forno de pré-aquecimento. Para retirar a coquilha do forno usam-se as luvas térmicas. E fecha-se a porta de imediato.
2. Acoplar o sistema de vácuo à coquilha. Nesta tarefa basta efetuar a ligação e acionar a bomba de vácuo. É importante verificar o vedante de ligação a cada utilização.

3. Remover o bronze do forno de fusão e vaziar. O primeiro passo nesta tarefa consiste em retirar o bronze do forno de fusão e fechar de imediato a porta. De seguida, remover a escória com uma colher e quebrar a película de óxidos com uma vareta de alumina. Por fim realiza-se o vazamento.
4. Desligar o sistema de vácuo. Apenas se deve desligar a bomba, uma vez que o bronze está em processo de arrefecimento.
5. Limpar o cadinho. A elevada temperatura em que se encontra o cadinho permite a remoção quase total da escória e dos óxidos, em contrapartida esta situação torna-o mais quebradiço.

O diagrama apresentado na Figura 39 tem em consideração a presença no mínimo de dois operadores, por motivos de segurança.

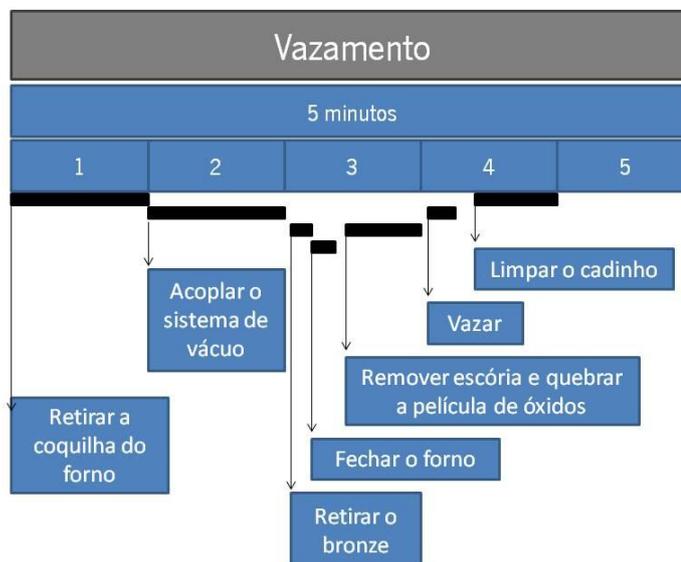


Figura 39: Diagrama de vazamento

Desmoldação

Esta é a última etapa do ciclo que consiste em retirar o bronze da coquilha e realizar as operações de corte.

1. Remover o sistema de vácuo. O sistema de vácuo deve ser removido antes de se abrir a moldação, porque permite ganhar algum tempo adicional para a consistência das varetas. De salientar que em simulação numérica 30 a 60 segundos será o suficiente para o bronze solidificar ao ponto de ser manuseado. Logo será este o compasso de espera para a remoção do sistema de vácuo.
2. Abertura da moldação. Logo após a remoção do sistema de vácuo pode-se abrir a moldação e retirar as varetas e os gitos.

3. Corte dos gitos. Tendo em conta que as varetas ainda quentes quebram com bastante facilidade, recomenda-se o corte após uma hora da abertura. Esta tarefa pode ser realizada nos tempos mortos.
4. Limpeza da moldação. A limpeza da moldação é necessária a cada fusão, devido à erosão da camada de refratário. A limpeza é feita com passagens de palha-de-aço, sem exercer grande força para não danificar a superfície da coquilha.

A desmoldação, apesar de não ser complexa, requer muitos cuidados de manuseamento. O carácter frágil do bronze torna as varetas quebradiças e em situações de choque estas podem ser danificadas com muita facilidade.

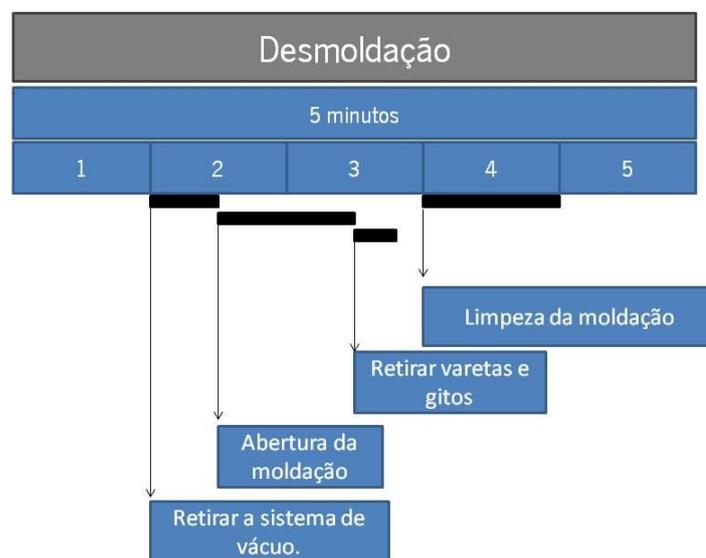


Figura 40: Diagrama de desmoldação

Nota: Ao analisar separadamente cada uma das etapas é deduzido que em cadência de trabalho cada ciclo pode demorar 30 minutos. Caso se justifique, uma forma de reduzir drasticamente cada ciclo é a aquisição de uma coquilha e cadinhos adicionais, sem considerar processos e automatização.

6. Apresentação e discussão de resultados experimentais e numéricos

6.1. Análise numérica da coquilha de 3 varetas

Antes de ser efetuada a alteração da coquilha de Integradora V para uma versão de 3 varetas foram realizados ensaios numéricos com auxílio do *software NovaFlow & Solid*.

Logo na iniciação das simulações foi detetado que o *software* não tinha na sua base de dados alguns dos dados cruciais para os ensaios numéricos, como o tipo de bronze utilizado e as pressões de trabalho que iriam ser utilizados no interior da moldação. Quanto ao bronze, foi utilizado o que se encontrava disponível na base de dados para simulação, cuja composição é essencialmente cobre (88% <Cu <90%) e o restante é estanho. A liga no *software* está identificada pelo código CC480k (CuSn10) norma europeia, que equivale à liga normalizada ASTM C90700. Esta liga tem um ponto de fusão mais elevado daquela que se pretende usar, esta condição serviu como um coeficiente de segurança. O cálculo para a introdução das novas pressões foi realizada conforme o indicado no Anexo IV.

Em fundição há um vasto número de varáveis e todas com enorme influência nos resultados obtidos. A realização das simulações numéricas foi feita com vista a 3 fases distintas de resultados, esta opção permitiu simplificar a leitura de resultados e verificar eventuais discrepâncias de resultados:

- 1 – Vazamento na coquilha de 3 varetas;
- 2 – Comparação dos resultados com o vazamento de uma liga de Alumínio Silício e de Latão;
- 3 – Comparação com o processo de vazamento em nascente.

Ainda no seguimento das condições iniciais, algumas foram tidas como adquiridas e é prática recorrente da indústria da fundição e neste contexto foram fixadas, como são o caso de:

- **Pintura refratária:** Assumiu-se que a pintura refratária de revestimento da coquilha tem a espessura de 0,1mm e a condutividade térmica de $2\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. [1] [26]
- **Condições de vazamento do cadinho:** Tendo em conta um cadinho de 250ml ($2.5\times 10^{-4}\text{m}^{-3}$), a altura de vazamento foi considerada de 80mm, a inclinação de 15° e com um caudal de $0,5\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

6.1.1. Vazamento na coquilha de 3 varetas

Após idealização da evolução da coquilha inicial para a versão de 3 varetas (Anexo VII.), foram realizados os ensaios numéricos. As varetas têm 3 diâmetros diferentes, (2, 3 e 5mm), sendo previsível que nas varetas de 2mm deveriam dar resultados pouco animadores devido à elevada viscosidade do bronze.

Definidas as geometrias da moldação e desenhadas em *SolidWorks*, fez-se a migração para o *Novaflo* & *Solid* onde se testaram as combinações das seguintes variáveis (Tabela 8):

Tabela 8: Variáveis utilizadas na análise numérica para o bronze

Temperatura do bronze	Temperatura da bacia de vazamento	Temperatura da coquilha	Pressão na cavidade
– 1050°C	– 150°C	– 150°C	– 1.0Bar
– 1100°C	– 200°C	– 200°C	– 0.8Bar
– 1150°C	– 250°C	– 250°C	– 0.6Bar
– 1200°C	– 300°C	– 300°C	– 0.4Bar
	– 350°C	– 350°C	
	– 400°C	– 400°C	
	– 450°C		
	– 500°C		
	– 550°C		
	– 600°C		
	– 1000°C		

Das combinações efetuadas, resultaram 1056 ensaios numéricos que se encontram em suporte digital. De seguida estão representados os resultados mais relevantes que permitem mostrar qual o caminho e a melhor combinação possível de variáveis. Os resultados apresentados estão em percentagem de preenchimento.

Temperatura do bronze

A temperatura do metal líquido tem sempre um sobreaquecimento, cujo objetivo é manter o metal o mais fluido possível para preencher os pormenores da moldação. No entanto o sobreaquecimento em excesso é contraproducente, porque aumenta a velocidade de oxidação, aumenta a quantidade de escória, reduz o número de ciclos, pode alterar a composição química, aumenta a contração metálica, reduz o tempo de vida dos materiais usados (moldações, cadinhos, fornos etc.) e retarda a nucleação e consequente crescimento de grão.

Na Tabela 9 estão os resultados da percentagem de preenchimento da coquilha em função do sobreaquecimento e da pressão no interior da moldação.

Tabela 9: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de temperatura do bronze (Temperatura da bacia e da coquilha 250°C)

		T do bronze			
		1050°C	1100°C	1150°C	1200°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	98,98	99,36	99,62	99,75
	0,8 Bar	99,04	99,3	99,65	99,79
	0,6 Bar	99,04	99,28	99,67	99,72
	0,4 Bar	99,01	99,3	99,62	99,72

Os resultados apresentados apenas se referem a um pré-aquecimento da coquilha e da bacia de vazamento de 250°C, cuja seleção se deve ao facto de o aço utilizado fragilizar aos 270°C. Ao construir o Gráfico 2 utilizando os valores da Tabela 9 é bastante perceptível a influência a sobreaquecimento no processo.

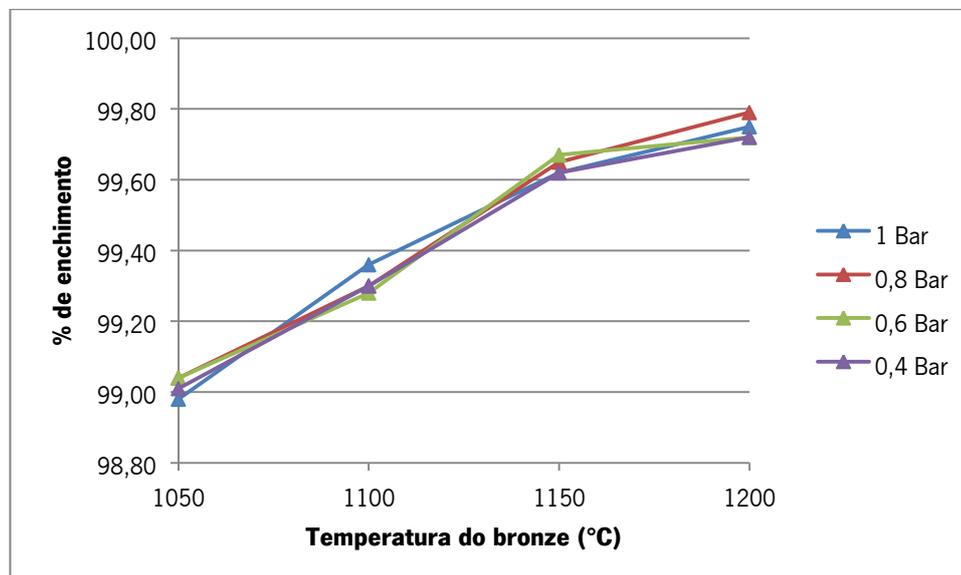


Gráfico 2: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C

Conforme havia sido mencionado anteriormente, um maior sobreaquecimento é bastante vantajoso quando se pretende melhorar o preenchimento, porém é crucial não esquecer as desvantagens que daí advêm. Os intervalos das temperaturas de trabalho recomendadas para fundição são para as ligas C92800 e C91300 de 1175°C a 1260°C e de 1040°C a 1095°C respetivamente [9]. Na liga C90700 (Cu-≈%10Sn), usada na simulação, o intervalo de trabalho é de 1040°C a 1095°C, o que mostra a proximidade das ligas utilizadas e da simulada [9].

De salientar que nas várias combinações possíveis o comportamento é sempre de melhoria na percentagem de preenchimento, como se pretende demonstrar na Tabela 10, onde se encontram os dados para a temperatura da bacia de vazamento e da moldação para 400°C.

Tabela 10: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de temperatura do bronze (Temperatura da bacia e da moldação 400°C)

		T do bronze			
		1050°C	1100°C	1150°C	1200°C
Pressão na moldação	1 Bar	99,60	99,72	99,83	99,93
	0,8 Bar	99,53	99,64	99,85	99,96
	0,6 Bar	99,56	99,66	99,83	99,94
	0,4 Bar	99,55	99,68	99,85	99,98

Mesmo neste caso de contexto académico, ao transportar os dados para o Gráfico 3 é evidente a semelhança de comportamento que se pretende demonstrar face ao anterior exemplo.

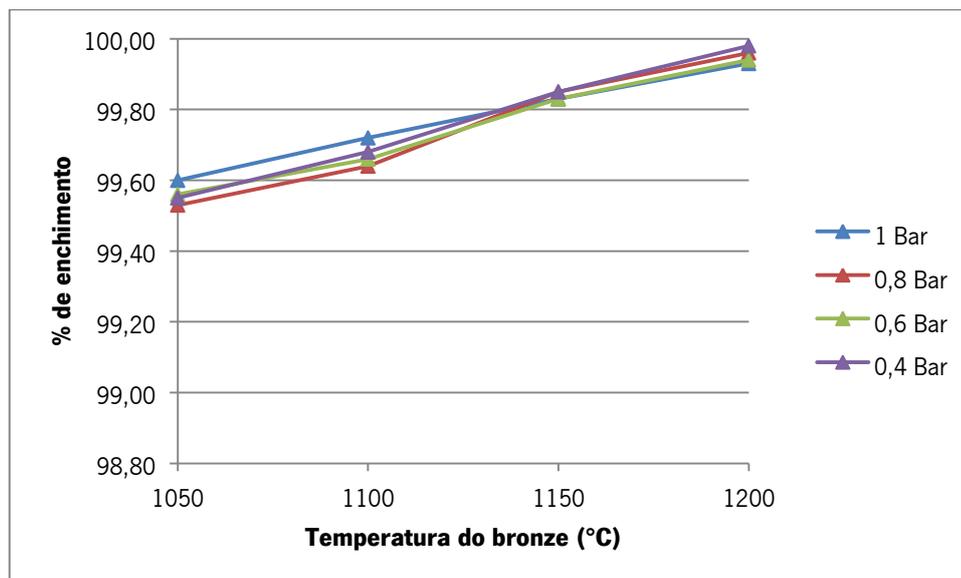


Gráfico 3: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 400°C

Resumidamente é possível afirmar, teoricamente, que trabalhar no limite máximo de sobreaquecimento é vantajoso na perspetiva de reduzir o número de rejeições por falha de preenchimento.

Temperatura da bacia de vazamento

Em ambiente industrial seria quase impensável realizar pré-aquecimento a duas partes distintas da mesma moldação, contudo o Laboratório de Tratamentos Térmicos permite testar esta possibilidade com custos adicionais reduzidos. Assim, partindo dessa possibilidade do DEM foram submetidas as várias hipóteses de temperaturas acima descritas de 150°C a 600°C com intervalos de 50°C e um intervalo alargado de 600°C a 1000°C.

Recorrendo aos mesmos critérios utilizados no ponto anterior foi construída a Tabela 11, onde a temperatura de pré-aquecimento da moldação é de 250°C e o bronze é aquecido a 1100°C.

Tabela 11: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia de vazamento (Moldação a 250°C e bronze a 1100°C)

		T da bacia de vazamento										
		150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	1000°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	99,27	99,41	99,36	99,35	99,42	99,33	99,31	99,22	99,40	99,32	99,43
	0,8 Bar	99,35	99,35	99,3	99,29	99,34	99,43	99,43	99,34	99,36	99,32	99,35
	0,6 Bar	99,35	99,25	99,28	99,3	99,37	99,31	99,24	99,34	99,29	99,37	99,42
	0,4 Bar	99,32	99,39	99,3	99,31	99,31	99,41	99,36	99,44	99,4	99,4	99,48

Com o intuito de simplificar a leitura da tabela procedeu-se a alguns ajustes, primeiro foi anulado a coluna dos 1000°C, porque se encontra muito próximo da temperatura de *liquidus* do material simulado (1013°C), por fim alargaram-se os intervalos para 100°C, como forma de evitar excesso de informação

Tabela 12: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia de vazamento (Moldação a 250°C e bronze a 1100°C)
Versão reduzida

		T da bacia de vazamento				
		150°C	250°C	350°C	450°C	550°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	99,27	99,36	99,42	99,31	99,40
	0,8 Bar	99,35	99,3	99,34	99,43	99,36
	0,6 Bar	99,35	99,28	99,37	99,24	99,29
	0,4 Bar	99,32	99,3	99,31	99,36	99,4

O Gráfico 7 construído a partir dos dados da Tabela 7 torna mais legíveis os resultados obtidos do *software*.

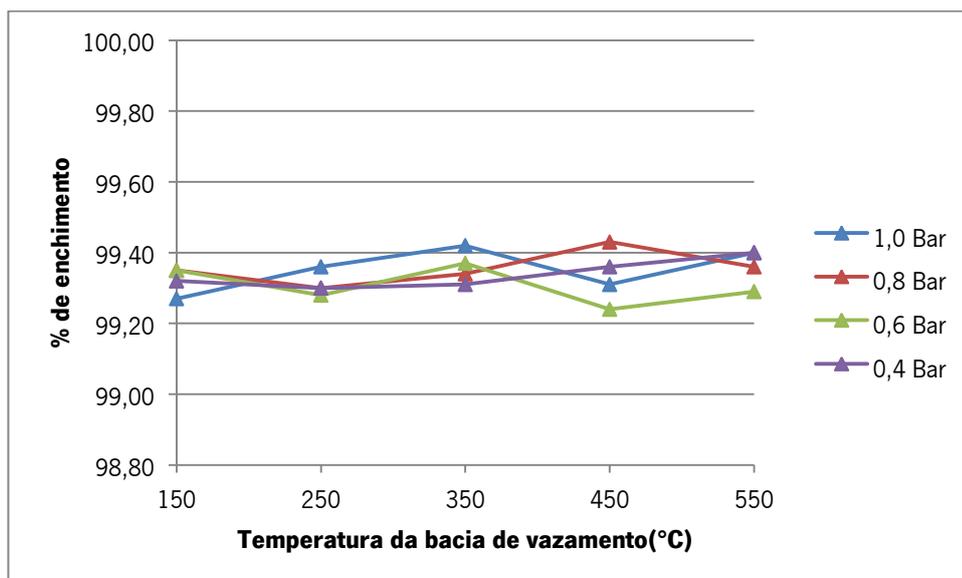


Gráfico 4: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha 250°C e do bronze a 1100°C

O Gráfico 4 mostra claramente que o pré-aquecimento da bacia de vazamento não interfere significativamente no aumento da percentagem de enchimento. O mesmo se verifica em várias das simulações efetuadas, mesmo em pré-aquecimentos mais elevados. A Tabela 13, já em versão reduzida, foi construída com base numa simulação em que a coquilha está a uma temperatura inicial de 400°C.

Tabela 13: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia de vazamento (Moldação a 400°C e bronze a 1100°C)
Versão reduzida

		T da bacia de vazamento				
		150°C	250°C	350°C	450°C	550°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	99,69	99,71	99,68	99,71	99,72
	0,8 Bar	99,69	99,7	99,69	99,7	99,68
	0,6 Bar	99,7	99,68	99,66	99,74	99,7
	0,4 Bar	99,64	99,68	99,7	99,72	99,66

À imagem do exemplo anterior, a Tabela 13 originou Gráfico 5. Este exemplo mostra mais uma vez que a temperatura da bacia de vazamento praticamente não interfere na percentagem preenchida.

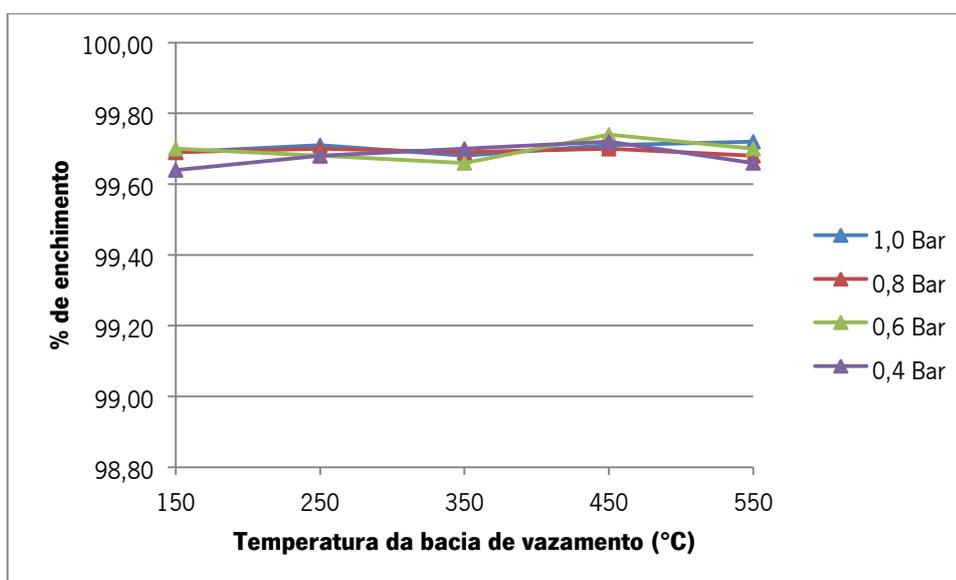


Gráfico 5: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha 400°C e do bronze a 1100°C

Inicialmente havia a ideia que ao atrasar a nucleação na bacia haveria mais metal líquido disponível para preencher as varetas, a Figura 41 mostra que após 0,38s de vazamento as varetas já se encontram em processo de solidificação, enquanto o coquilha ainda está em enchimento. A situação verificada é influenciada por 2 fatores, o primeiro é provocado pela grande diferença de secção entre a bacia e a moldação, o segundo é provocado pelo reduzido diâmetro das varetas de 3 e 2mm, que provocam uma rápida nucleação nas paredes obstruindo a passagem de metal líquido.

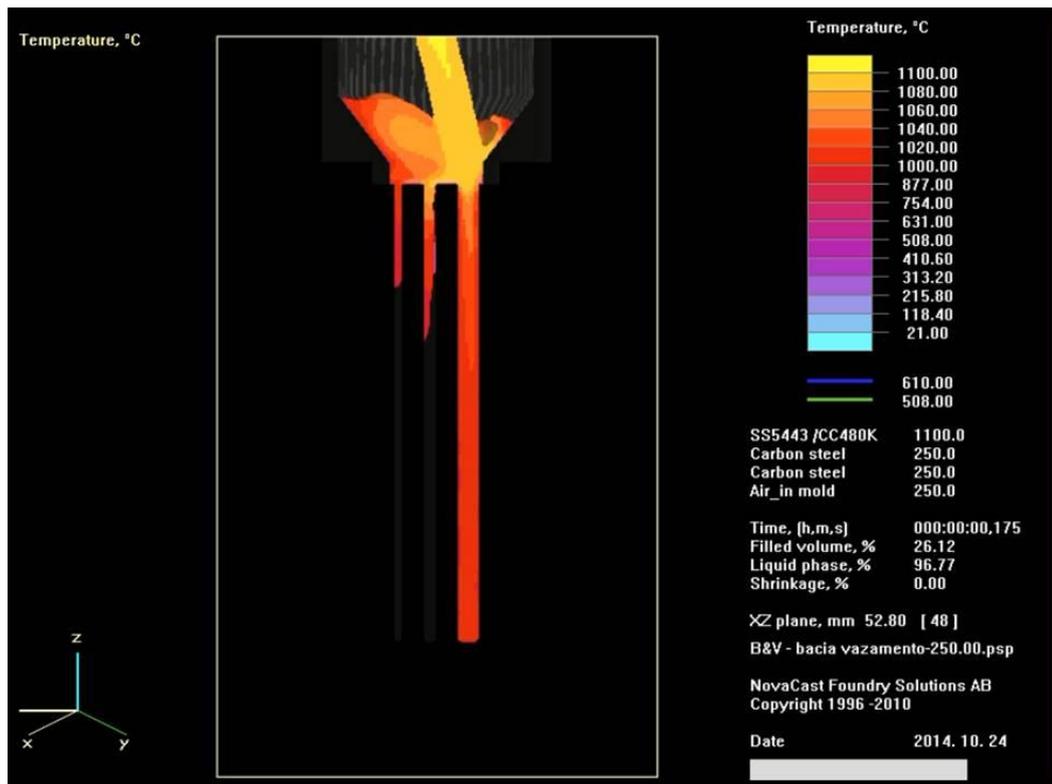


Figura 41: Vazamento a 1100°C, à pressão atmosférica e com pré-aquecimento da moldação e bacia a 250°C

Neste contexto pode-se afirmar, na moldação em questão, que o aquecimento da bacia separadamente da moldação não confere qualquer vantagem adicional ao processo.

Temperatura da coquilha

O pré-aquecimento das moldações é prática recorrente na indústria. Para comprovar as vantagens dessa prática foram aproveitados os dados das simulações numéricas efetuadas.

Na Tabela 14 os dados de entrada assumem que a bacia de vazamento e a moldação são pré-aquecidos em conjunto. A temperatura do metal líquido é de 1100°C.

Tabela 14: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia e moldação (bronze a 1100°C)

		T da bacia e da moldação					
		150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	99,03	99,16	99,36	99,56	99,61	99,72
	0,8 Bar	99,05	99,18	99,3	99,47	99,69	99,64
	0,6 Bar	99,1	99,24	99,28	99,52	99,64	99,66
	0,4 Bar	99,02	99,21	99,3	99,58	99,64	99,68

A leitura do Gráfico 6 permite constatar a que a subida da percentagem de enchimento é proporcional à subida de pré-aquecimento da moldação e da bacia de vazamento.

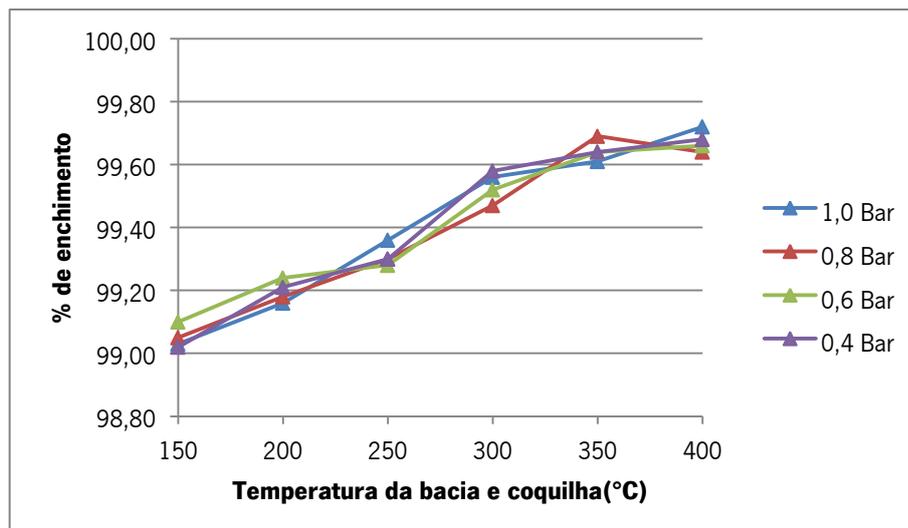


Gráfico 6: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia e coquilha, para uma temperatura de vazamento do bronze a 1100°C

Aproveitando os vários resultados obtidos durante as simulações, transformaram-se os dados obtidos para temperatura de vazamento de 1150°C na Tabela 15.

Tabela 15: Percentagem de enchimento, ensaios numéricos do pré-aquecimento da bacia e moldação (bronze a 1150°C)

		T da bacia e da moldação					
		150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	99,26	99,53	99,62	99,70	99,70	99,83
	0,8 Bar	99,31	99,46	99,65	99,68	99,75	99,85
	0,6 Bar	99,4	99,54	99,67	99,66	99,78	99,83
	0,4 Bar	99,32	99,56	99,62	99,68	99,71	99,85

O Gráfico 7 comprova a tendência de melhoria do preenchimento das moldações em função da subida da temperatura de pré-aquecimento das moldações em várias condições.

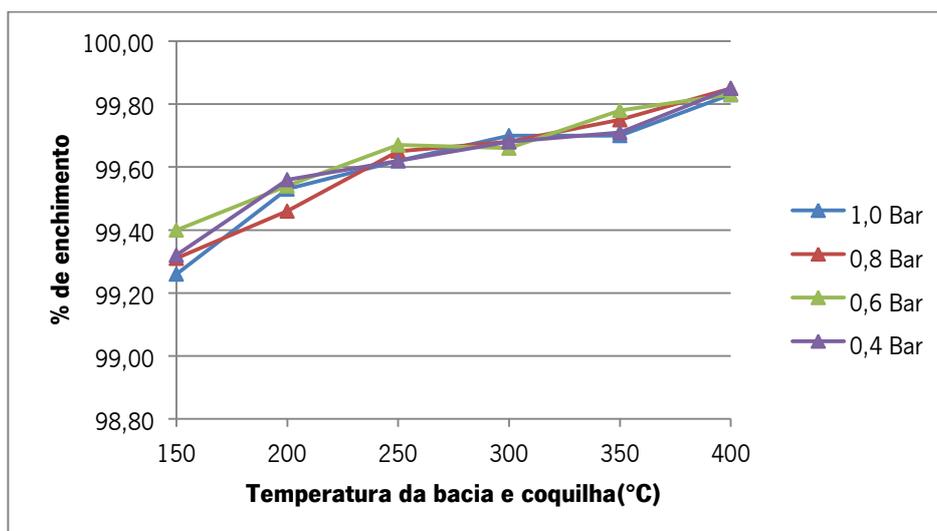


Gráfico 7: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de pré-aquecimento da bacia e coquilha, para uma temperatura de vazamento do bronze a 1150°C

Dos resultados obtidos pode-se concluir que trabalhar no limite do aquecimento das moldações reduz-se o número de peças rejeitadas por falta de enchimento.

Pressão na cavidade moldante

As baixas pressões no interior da moldação foram variáveis adicionadas ao *software*. Não foi por acaso que nos pontos anteriores se discriminou as pressões nas diversas tabelas e gráficos. Independentemente das situações expostas verifica-se que nos limites de pressão utilizados não há variações significativas. No entanto durante as enumeras simulações efetuadas foi detetada uma variação que explica a vantagem da introdução de vácuo no processo, essa observação está exposta na Tabela 16.

Tabela 16: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de temperatura de bronze (Temperatura da bacia e moldação 400°C)

		T do bronze			
		1050°C	1100°C	1150°C	1200°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	99,60	99,72	99,83	99,93
	0,8 Bar	99,53	99,64	99,85	99,96
	0,6 Bar	99,56	99,66	99,83	99,94
	0,4 Bar	99,55	99,68	99,85	99,98

Ao passar a informação para o Gráfico 8 é possível verificar que o aumento da temperatura do bronze, combinado com uma temperatura elevada da moldação e a redução da pressão, garantem um melhor preenchimento da moldação, com resultados muito próximo dos 100%.

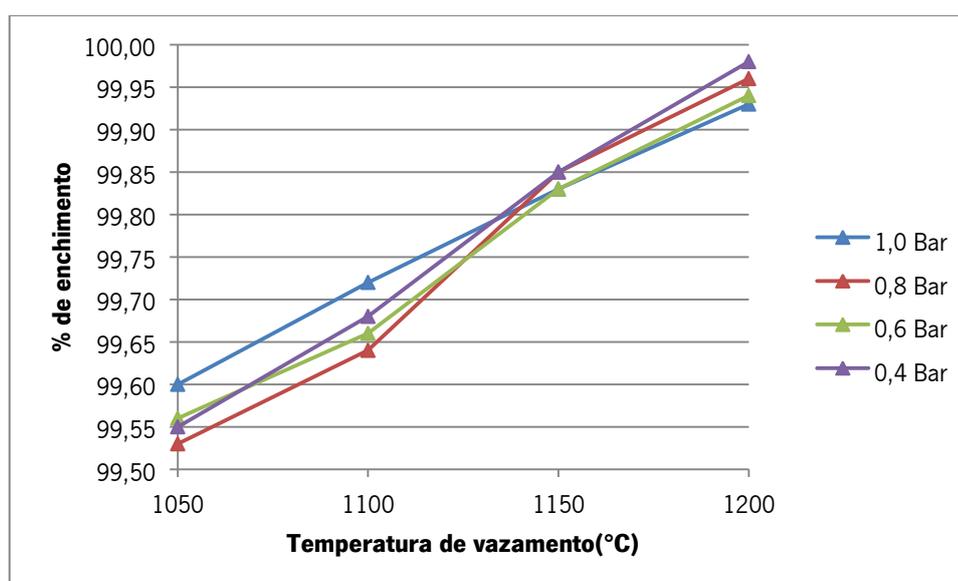


Gráfico 8: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento do bronze, para um pré-aquecimento da coquilha e da bacia a 400°C

A diferença existente, juntamente com o facto de em fundição injetada a presença do vácuo garantir melhores resultados, permitiram encarar esta opção como válida para reduzir as rejeições no desenvolvimento de um processo assistido por vácuo.

6.1.2. Comparação dos resultados com o vazamento de uma liga de Alumínio Silício e de uma de Latão

Como forma de validar os resultados das hipóteses testadas anteriormente, foram realizadas novas análises numéricas a ligas com características diferentes do bronze; uma liga de Al-Si mais fluída e com uma temperatura de fusão mais baixa que o bronze e uma liga de Cu-Zn (Latão) com um ponto de fusão próximo do bronze e também mais fluído. Para ambas as ligas foram adicionadas 144 novas simulações.

Liga de Alumínio-Silício

No caso da liga de Al-Si foi usada a liga AC-44100 (Al \approx 12%Si) com um ponto de fusão a 591°C. Os parâmetros de entrada foram os seguintes:

Tabela 17: Variáveis utilizadas na análise numérica para a liga de Al-Si

Temperatura do Alumínio	Pré-aquecimento da bacia e da coquilha	Pressão na cavidade
– 600°C	– 150°C	– 1.0Bar
– 650°C	– 200°C	– 0.8Bar
– 700°C	– 250°C	– 0.6Bar
	– 300°C	– 0.4Bar
	– 350°C	
	– 400°C	

No caso do alumínio foi simples a construção de uma tabela única com todos os resultados, uma vez que apenas os vazamentos para temperaturas de sobreaquecimento ligeiramente superiores à temperatura de *liquidus* ficaram incompletos. Na Tabela 18 esses valores estão indicados a verde, também se pode verificar que a falha de preenchimento se encontra para baixas temperaturas de pré-aquecimento da moldação.

Tabela 18: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos da liga de Al-Si

		Sobreaquecimento	Temperatura da bacia e da moldação					
			150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	<i>líquidus</i>	99,92	99,95	100,00	100,00	100,00	100,00
		+50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		+100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	0,8 Bar	<i>líquidus</i>	99,86	99,94	100,00	100,00	100,00	100,00
		+50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		+100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	0,6 Bar	<i>líquidus</i>	99,88	99,94	100,00	100,00	100,00	100,00
		+50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		+100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	0,4 Bar	<i>líquidus</i>	99,84	99,94	100,00	100,00	100,00	100,00
		+50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		+100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Em contrapartida ao elaborar a Tabela 19, dentro dos mesmos procedimentos para o bronze, é possível verificar que em nenhuma das situações se prevê um ensaio pleno.

Tabela 19: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos do bronze

		Sobreaquecimento	Temperatura do da bacia e da moldação					
			150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	líquidus	98,79	98,87	98,98	99,15	99,35	99,60
		+50°C	99,03	99,16	99,36	99,56	99,61	99,72
		+100°C	99,26	99,53	99,62	99,70	99,70	99,83
	0,8 Bar	líquidus	98,76	98,82	99,04	99,13	99,38	99,53
		+50°C	99,05	99,18	99,30	99,47	99,69	99,64
		+100°C	99,31	99,46	99,65	99,68	99,75	99,85
	0,6 Bar	líquidus	98,76	98,85	99,04	99,11	99,42	99,56
		+50°C	99,10	99,24	99,28	99,52	99,64	99,66
		+100°C	99,40	99,54	99,67	99,66	99,78	99,83
	0,4 Bar	líquidus	98,75	98,88	99,01	99,18	99,35	99,55
		+50°C	99,02	99,21	99,30	99,58	99,64	99,68
		+100°C	99,32	99,56	99,62	99,68	99,71	99,85

Os resultados obtidos foram os esperados, devido à baixa viscosidade do alumínio que permite um ótimo enchimento neste tipo de tecnologia. Por outro lado a elevada viscosidade do bronze não permite ensaios conseguidos. Por fim a redução de preenchimento em baixa pressão na liga de alumínio deve-se à separação do metal líquido.

Liga de Latão

A liga de Latão utilizada para efetuar a comparação é C28000 (Cu≈40%Zn), cujo ponto de fusão é 898°C e os dados de entrada utilizados foram os seguintes:

Tabela 20: Variáveis utilizadas na análise numérica para a liga de Cu-Zn (latão)

Temperatura do Latão	Pré-aquecimento da bacia e da coquilha	Pressão na cavidade
– 950°C	– 150°C	– 1.0Bar
– 1000°C	– 200°C	– 0.8Bar
– 1050°C	– 250°C	– 0.6Bar
	– 300°C	– 0.4Bar
	– 350°C	
	– 400°C	

Se a comparação de entre uma liga de alumínio e o bronze é simples, o mesmo não se passa com o latão. Para uma melhor compreensão os resultados foram separados.

Na Tabela 21 estão apresentados os dados para o latão e bronze à pressão atmosférica, com 3 sobreaquecimentos e com diferentes pré-aquecimentos da moldação.

Tabela 21: Percentagem de enchimento nos ensaios numéricos de latão e bronze (Pressão a 1Bar)

		Sobreaquecimento	Temperatura do da bacia e da coquilha					
			150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
Liga	Latão	<i>líquidus</i>	98,86	98,92	99,07	99,41	99,51	99,68
		+50°C	99,29	99,37	99,60	99,69	99,65	99,76
		+100°C	99,62	99,65	99,72	99,86	99,95	99,99
	Bronze	<i>líquidus</i>	98,79	98,87	98,98	99,15	99,35	99,60
		+50°C	99,03	99,16	99,36	99,56	99,61	99,72
		+100°C	99,26	99,53	99,62	99,70	99,70	99,83

No Gráfico 9 estão os dados da tabela anterior, onde em tons de verde se encontram os valores referentes ao latão e a azul estão os do bronze.

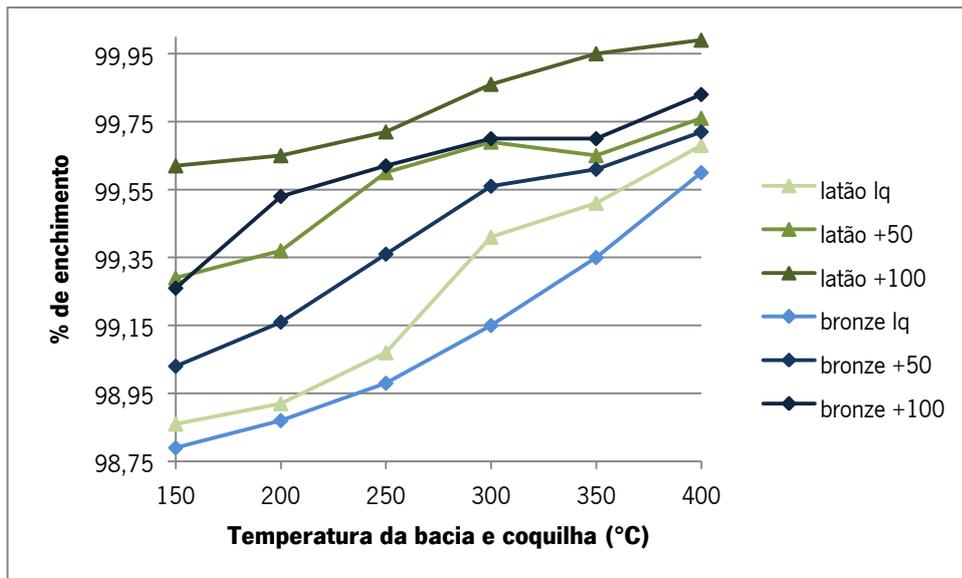


Gráfico 9: Variação da % de enchimento da coquilha com vazamento de latão e bronze com diferentes sobreaquecimentos e diferentes pré-aquecimentos da bacia e coquilha, para pressão interna da coquilha a 1Bar.

A informação prestada pelo Gráfico 9 mostra que a menor viscosidade do latão permite maiores percentagens de enchimento face ao bronze. Também neste Gráfico, mais uma vez, se verifica as melhorias de enchimento com maiores sobreaquecimentos.

Para verificar a influência da introdução da baixa pressão no sistema, apenas se usaram os valores obtidos para a pressão 0,4Bar, uma vez que se mantem o mesmo comportamento nas pressões intermédias (Tabela 22).

Tabela 22: Percentagem de enchimento, nos ensaios numéricos de latão e bronze (Pressão a 0,4Bar)

		Sobreaquecimento	Temperatura do da bacia e da moldação					
			150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
Liga	latão	líquidus	98,87	99,04	99,15	99,27	99,53	99,68
		+50°C	99,36	99,31	99,67	99,73	99,70	99,75
		+100°C	99,59	99,76	99,80	99,85	99,90	99,95
	bronze	líquidus	98,75	98,88	99,01	99,18	99,35	99,55
		+50°C	99,02	99,21	99,30	99,58	99,64	99,68
		+100°C	99,32	99,56	99,62	99,68	99,71	99,85

O Gráfico 10 confere a hipótese testada anteriormente à pressão atmosférica. A melhor fluidez do latão oferece melhores enchimentos que o bronze.

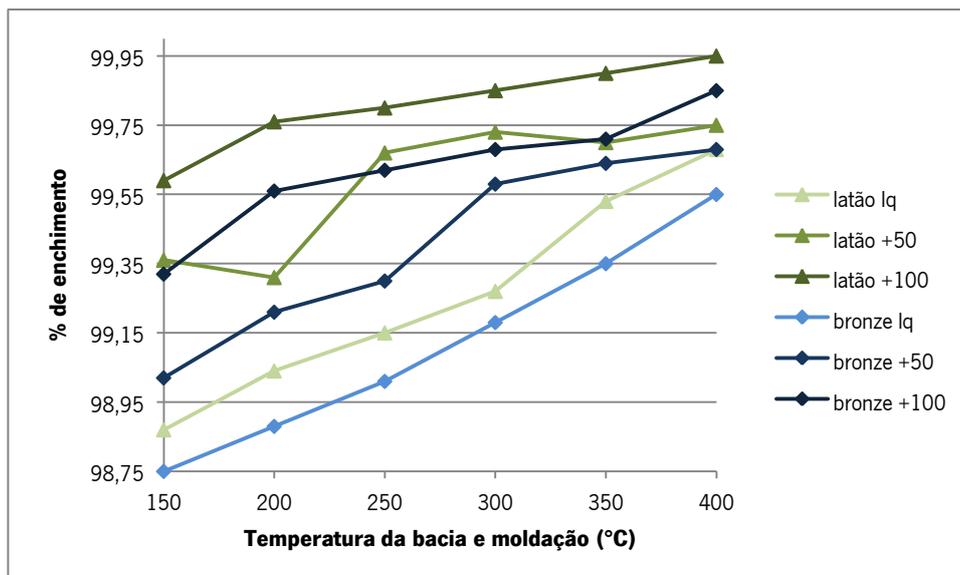


Gráfico 10: Variação da % de enchimento da coquilha com vazamento de latão e bronze com diferentes sobreaquecimentos e diferentes pré-aquecimentos da bacia e coquilha, para pressão interna da coquilha a 0,4Bar.

Quanto à influência da pressão no processo para uma liga mais fluida as tabelas e gráficos anteriores não são conclusivos, por este facto se fez uma nova comparação de resultados, desta feita apenas com os resultados obtidos para o latão (Tabela 23).

Tabela 23: Ensaio numéricos do latão

		Temperatura do da bacia e da moldação						
		Sobreaquecimento	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	líquidus	98,86	98,92	99,07	99,41	99,51	99,68
		+50°C	99,29	99,37	99,60	99,69	99,65	99,76
		+100°C	99,62	99,65	99,72	99,86	99,95	99,99
	0,4 Bar	líquidus	98,87	99,04	99,15	99,27	99,53	99,68
		+50°C	99,36	99,31	99,67	99,73	99,70	99,75
		+100°C	99,59	99,76	99,80	99,85	99,90	99,95

Quando à discriminação das pressões no Gráfico 11 estão em diferentes tonalidades, verde para a pressão atmosférica e azul para 0,4Bar.

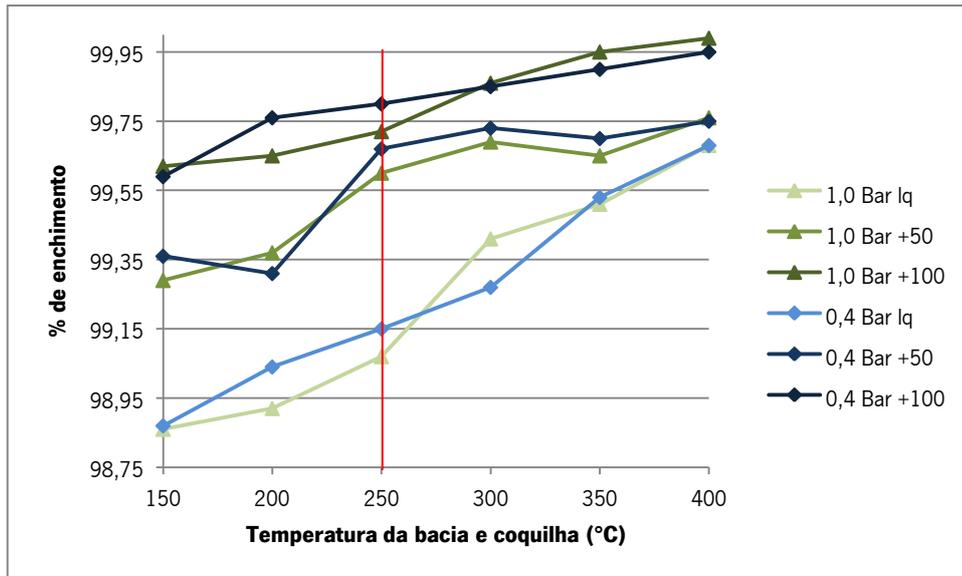


Gráfico 11: Variação da % de enchimento da coquilha com vazamento de latão e bronze com diferentes sobreaquecimentos, pré-aquecimentos da bacia e coquilha de 250°C e pressão interna da coquilha a 0,4Bar e 1Bar.

Ao observar os últimos dados é perceptível apenas uma ligeira vantagem na utilização de baixa pressão em ligas menos viscosas. No entanto, ao analisar a temperatura máxima de trabalho da coquilha ($\approx 250^{\circ}\text{C}$), a vantagem é mais evidente.

6.1.3. Comparação com o processo de vazamento em nascente

Durante as simulações do processo de vazamento direto foi detetado que durante a descida do bronze havia separação do metal líquido (Figura 42), aspeto que provoca descontinuidades nas peças e consequente rejeição em ambiente industrial.

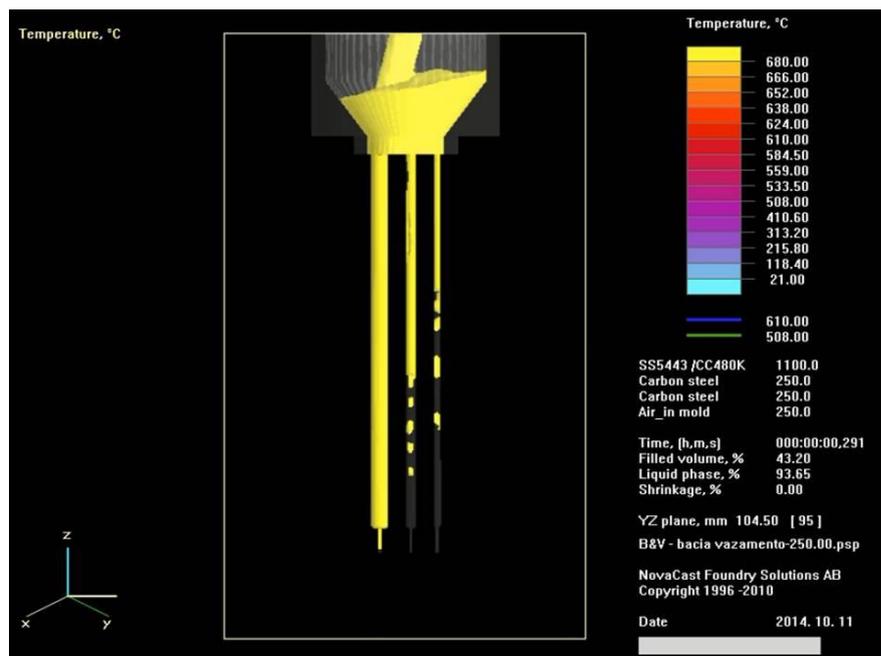


Figura 42: Separação de metal durante o vazamento

A separação do metal verificada, para além de provocar discontinuidades no procedimento tradicional, no processo em estudo iria obstruir os canais de escoamento de ar anulando o efeito de vácuo. Desta forma foi desenhada uma nova moldação para verificar o comportamento em ambiente de baixa pressão. Na modelação nova foi idealizado um novo canal de descida, acrescentado um canal de distribuição e reformulada a abordagem às varetas, que passou de uma disposição circular para a forma oval, reduzindo o impacto da diminuição de secção. A Figura 43 ilustra as varetas e os gitos idealizados para um processo em nascente.



Figura 43: Varetas e gitos da coquilha de vazamento à nascente

Para o processo em nascente ser equivalente ao da coquilha inicial era necessário garantir que a temperatura de vazamento e da distribuição fossem a mesma, para isso a coquilha foi modelada em duas peças (Figura 44).

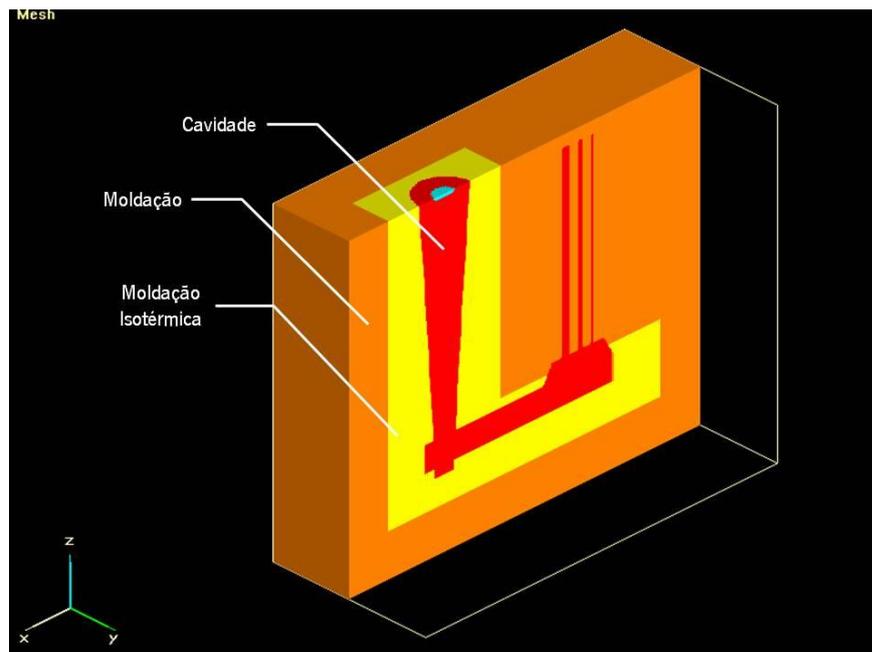


Figura 44: Moldação para vazamento à nascente

Durante a parametrização dos dados para a simulação foi atribuído um coeficiente de condução térmica de $0\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à moldação isotérmica (a amarelo na Figura 44), garantindo a temperatura de vazamento até ao ataque das varetas.

Outro problema existente era o volume vazado, se nas hipóteses anteriores a moldação testada foi sempre a mesma, a moldação à nascente necessitava de uma quantidade substancialmente superior. Esta situação iria influenciar as percentagens de enchimento. Ao realizar as primeiras simulações verificou-se que as falhas de preenchimento estavam nas varetas de 2 e 3mm, a solução encontrada para equiparar a percentagem de enchimento foi converter as falhas em volume retirado às varetas. Por fim, foi recalculada a nova percentagem de enchimento. Esta nova fórmula de cálculo reduz significativamente as percentagens de enchimento, porque deixa de ser considerado a quantidade de metal que se encontra nos gitos, passando exclusivamente a contar as varetas.

Resolvidos os problemas de equidade entre processos, foram adicionados 72 ensaios numéricos usando os seguintes critérios (Tabela 24):

Tabela 24: Variáveis utilizadas na análise numérica para a moldação de vazamento em nascente

Temperatura do bronze	Pré-aquecimento da bacia e da coquilha	Pressão na cavidade
– 1050°C	– 150°C	– 1.0Bar
– 1100°C	– 200°C	– 0.8Bar
– 1150°C	– 250°C	– 0.6Bar
– 1200°C	– 300°C	– 0.4Bar
	– 350°C	
	– 400°C	

Das várias combinações possíveis de resultados foi escolhido o exemplo da Tabela 25 para exemplificar as influências de diferentes variáveis nos 2 processos.

Tabela 25: Ensaios numéricos, resultados dos processos de vazamento em nascente e direto (Temperatura das moldações 250°C)

		Tipo de Vazamento	Temperatura do bronze			
			1050°C	1100°C	1150°C	1200°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	Nascente	90,76	93,74	95,83	96,72
		Direto	86,79	90,16	94,61	96,49
	0,4 Bar	Nascente	91,06	94,04	96,13	96,72
		Direto	86,25	90,83	94,61	96,76

Para tornar mais legíveis os dados foi elaborado o Gráfico 12, onde a informação do vazamento direto está em tonalidades vermelhas e o vazamento em nascente se encontra em tons de azul.

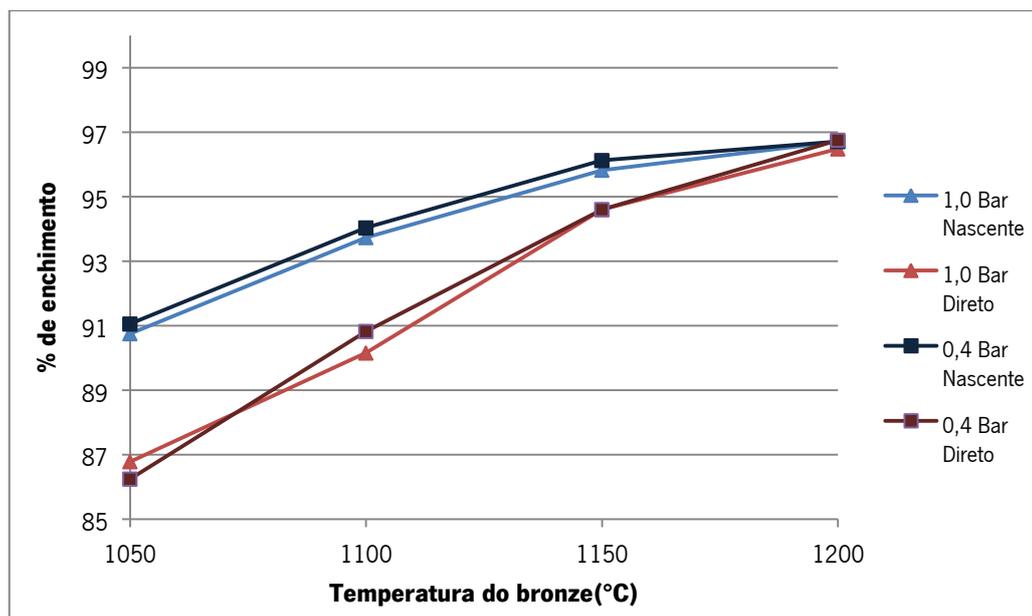


Gráfico 12: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha a 250°C e pressão interna da coquilha a 0,4Bar e 1Bar

No Gráfico 12 é possível verificar que no processo de vazamento em nascente é vantajoso para temperaturas de bronze mais baixas, com uma aproximação de resultados com o aumento da temperatura.

Entrando num contexto mais acadêmico, construiu-se a Tabela 26 onde as moldações são pré-aquecidas a 400°C.

Tabela 26: Ensaio numéricos, resultados dos processos de vazamento à nascente e direto (Temperatura das moldações 400°C)

			T do bronze			
			1050°C	1100°C	1150°C	1200°C
Pressão na moldação	1,0 Bar	Nascente	94,34	96,13	97,32	97,91
	1,0 Bar	Direto	94,61	96,22	97,71	99,06
	0,4 Bar	Nascente	94,34	96,13	97,32	97,62
	0,4 Bar	Direto	93,93	95,69	97,98	99,73

Transferindo os resultados para o Gráfico 13 e utilizando os critérios do passo anterior

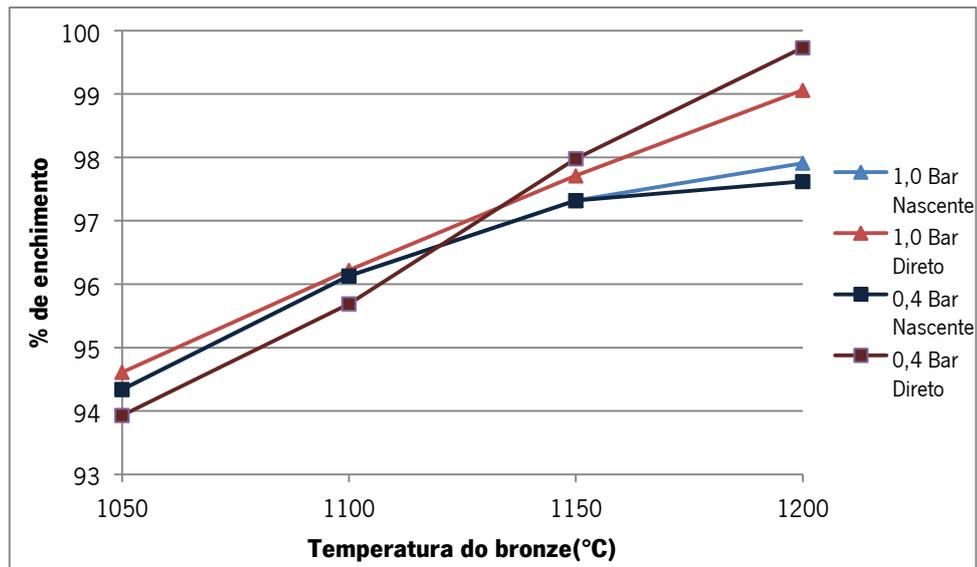


Gráfico 13: Resultados dos processos de vazamento à nascente e direto (Temperatura das moldações 400°C)

Ao conciliar a informação é possível afirmar que o aumento das temperaturas das moldações e do bronze, o uso de vácuo e a utilização de uma moldação de vazamento direto resulta num melhor enchimento. No entanto, é importante frisar, que no vazamento em nascente não há separação do metal líquido independentemente da pressão utilizada.

A vantagem na utilização de um processo em nascente é sobretudo a garantia de continuidade da peça evitando a separação do metal líquido durante o vazamento. No entanto o seu dimensionamento é mais complexo e a quantidade de sucata proveniente dos gitos é maior.

Informações adicionais

A análise numérica em *NovaFlow & Solid* permite obter uma perceção muito próxima do processo experimental. Porém, há algumas limitações que também interferem no processo e o *software* não prevê, alguns desses exemplos são:

- A libertação de gases;
- Direcionamento dos gases, quando se trabalha em baixa pressão;
- Erosão dos refratários;

Após o vasto número de simulações efetuadas verificou-se que a moldação tem capacidade para produzir varetas em alumínio. Em contexto mais académico, ao realizar determinadas conjugações de determinadas temperaturas entre moldação e bronze é possível ter preenchimentos muito próximo dos 100%, dentro do mesmo contexto, também se verificou a que a adição de vácuo pode melhorar o enchimento.

6.2. Apresentação e discussão de resultados experimentais

Após a conclusão dos ensaios numéricos foram realizados os ensaios práticos. O procedimento foi realizado em 4 fases distintas:

- Fase 1 – Coquilha inicial (1 vareta) sem refratário;
- Fase 2 – Coquilha inicial (1 vareta) com refratário;
- Fase 3 – Coquilha de 3 varetas;
- Fase 4 – Coquilha (1 vareta) sem sistema de vácuo.

Os ensaios foram numerados de 1 a 27 e caracterizados na Tabela 36 Anexo V. A incidência das hipóteses testadas recaiu na versão inicial de uma vareta (Figura 45A) e de três varetas (Figura 45B) da coquilha.

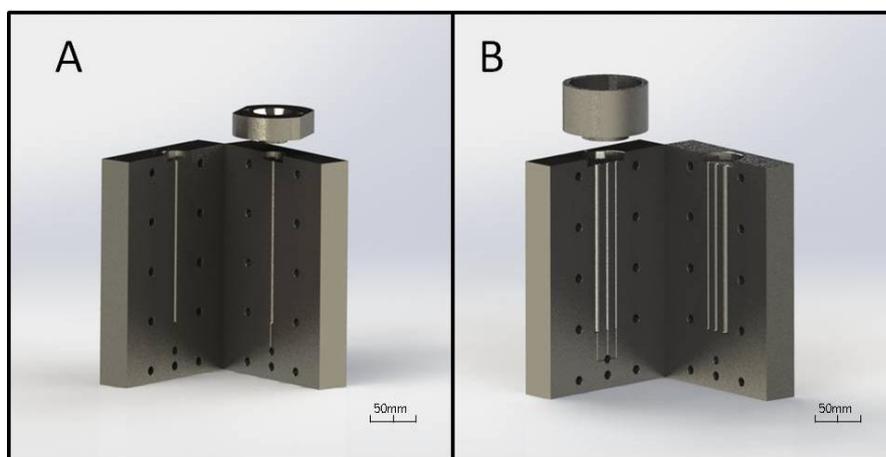


Figura 45 A:Coquilha inicial – B: Coquilha de 3 varetas

A evolução da versão inicial para a seguinte foi a maquinagem de dois rasgos adicionais de 2mm e 5mm de diâmetro paralelos ao central de 3mm, o alargamento do encaixe da bacia de 20mm para 32mm de diâmetro e um nova bacia para suportar a quantidade adicional de bronze a vazar (Anexo VII.).

Fase 1

Durante os vazamentos efetuados em Integradora V foram usadas chapas de estanho no fundo da bacia, que impedia a entrada de ar na cavidade moldante. Nesta fase apenas 2 ensaios foram realizados na perspectiva de verificar quais os motivos de insucesso nos vazamentos, uma vez que a selagem estava garantida. Para esse efeito mantiveram-se todas as variáveis exceto a chapa de estanho.

Os resultados obtidos após a análise efetuada à coquilha e às varetas obtidas mostravam os seguintes fatores:

1. O vácuo produzido provocava a separação do metal líquido que se depositava na zona de transição da vareta com o escoamento de ar (Figura 46).

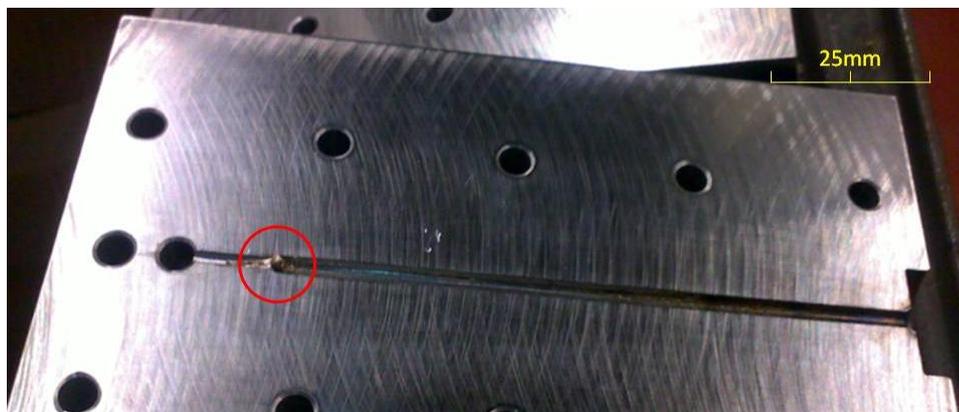


Figura 46: Bronze na zona de transição da vareta para o escoamento de ar

2. O atrito causado pelo metal líquido e o metal da coquilha também contribuiu para a falha de preenchimento.

Se o primeiro fator não oferecia qualquer dúvida face à visualização da gota metal, o segundo fator requeria ensaios adicionais para dissipar as dúvidas.

Fase 2

A forma encontrada para alterar o contacto entre a moldação e o metal líquido foi aplicar uma pintura refratária na superfície da coquilha. O primeiro ensaio desta fase originou de imediato uma vareta completa. Garantido o sucesso da hipótese colocada na fase anterior, foram realizados novos ensaios e conjugadas as variáveis.

Pintura refratária.

Conforme verificado logo no primeiro ensaio, a presença de refratário permitia obter peças completas. O material excedente que ficava nas superfícies internas impedia a união total das moldações. O procedimento encontrado para limpar o refratário excedente foi a utilização de palha-de-aço fina, bastando passar nas zonas a limpar, sem esfregar para produzir o mínimo de sulcos possível.

Pressão

Demonstrada a influência da tinta refratária no processo, foram feitos novos ensaios para testar novas combinações de variáveis. O vazamento em baixa pressão foi uma das variáveis testadas e aquela que mais interesse suscitava devido à sua relevância para o tema em estudo.

Sabendo de antemão que o vazamento do bronze a 1150°C tinha sido bem-sucedido à pressão atmosférica. De seguida foi reduzida a temperatura do bronze para 1050°C, com a coquilha pré-aquecida a 200°C (Gráfico 14).

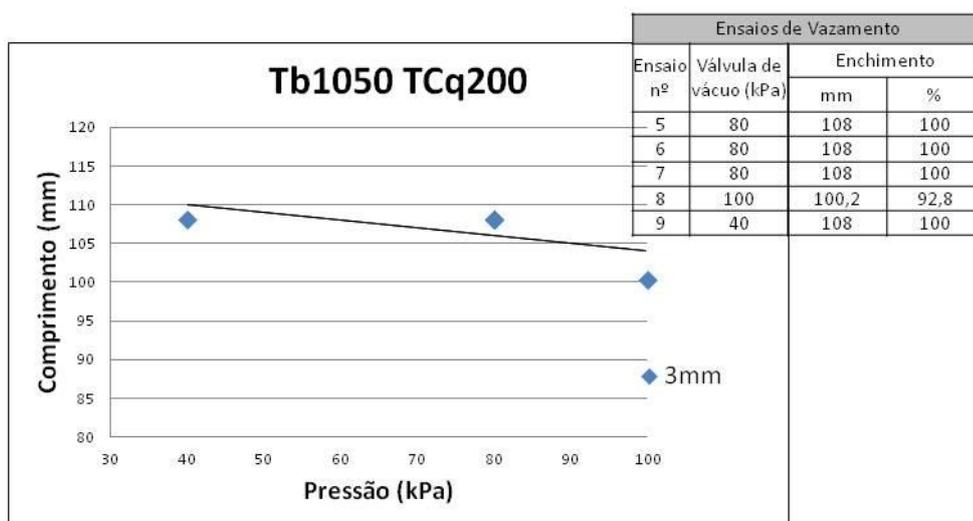


Gráfico 14: Variação do comprimento da vareta com a pressão interna da coquilha para uma temperatura de vazamento a 1050°C (Fase 2)

No Gráfico 14 é possível verificar através da linha de tendência linear que a redução da pressão permite obter varetas completas a 1050°C.

Temperatura do bronze

O aumento da temperatura do bronze ajuda a melhorar o preenchimento das moldações, em contrapartida a velocidade de oxidação aumenta inviabilizando nalguns casos a o processo. Neste parâmetro pretendia-se ver até que ponto era possível baixar a temperatura do bronze utilizando vácuo. Para testar esta hipótese foi fixada a pressão a 80kPa, com o pré-aquecimento da coquilha a 200°C (Gráfico 15).

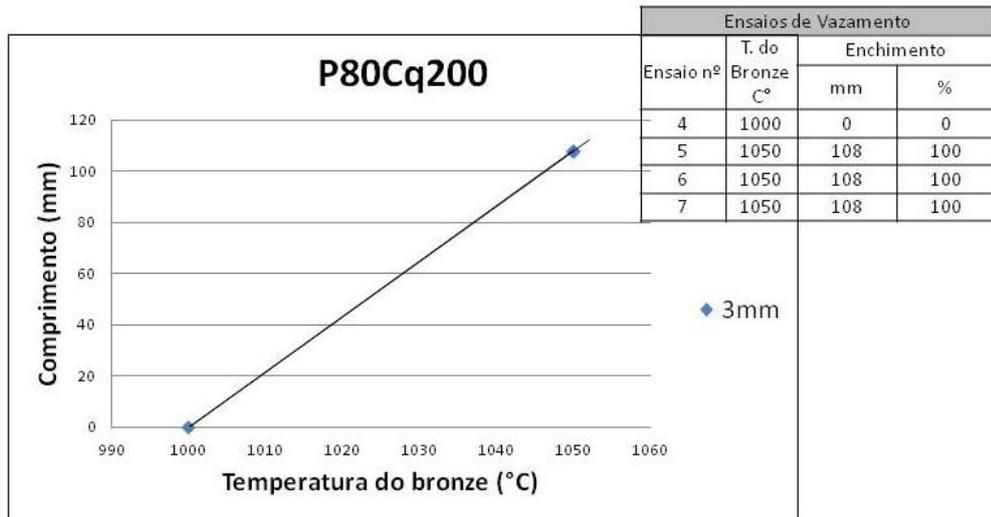


Gráfico 15: Variação do comprimento da vareta com a temperatura de vazamento, para uma pressão interna da coquilha de 80kPa (Fase 2) e um pré-aquecimento da coquilha a 200°C.

Com a redução da temperatura do bronze para 1000°C foi verificado de imediato que não se conseguiria preencher a vareta a 80kPa.

O Gráfico 16 ilustra algumas das combinações entre pressão e temperatura do metal líquido que permitiram obter varetas completas.

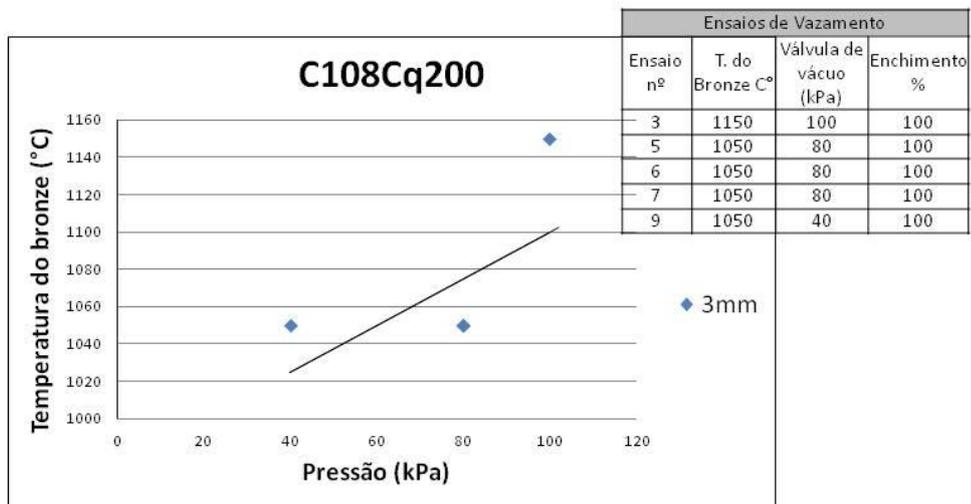


Gráfico 16: Variação da temperatura de vazamento com a pressão interna da coquilha, para um pré-aquecimento da coquilha à temperatura de 200°C e que ensaios onde se obtiveram varetas completas (Fase 2)

Ao traçar a linha de tendência linear é possível visualizar que há uma utilização de baixa pressão permite reduzir a temperatura do bronze reduzindo a formação de óxidos.

Além dos dados apresentados nos gráficos anteriores o facto de a coquilha estar pré-aquecida a 200°C em todos os ensaios, significa que ainda há uma margem de manobra de $\approx 70^\circ\text{C}$ de pré-aquecimento antes de fragilizar a coquilha.

Fase 3

Na terceira etapa a coquilha voltou a ser maquinada para se vazarem 3 varetas em simultâneo, também a bacia teve que ser alterada para comportar as novas quantidades de bronze necessárias. Os principais objetivos das modificações eram a melhoria de rendimento da coquilha e tentar obter varetas mais finas do que aquelas conseguidas na fase anterior.

Na Tabela 36 do Anexo V. está mencionada a pressão inicial do ensaio que corresponde àquela que foi testada antes do vazamento e a pressão final referente à medição efetuada após a solidificação. A divergência de resultados entre as duas medições deve-se a dois fatores:

- Vedante da ligação ao circuito de vácuo ficou danificado durante o vazamento (o vedante é feito de um polímero);
- Entrada de ar após a contração do bronze.

Pressão

O Gráfico 17 apresenta os dados relativos às 3 espessuras de varetas produzidas com a temperatura do bronze a 1050°C e a moldação com o pré-aquecimento de 250°C. A seleção das condições iniciais recaiu sobre aquelas que garantiriam a menor temperatura de vazamento bem-sucedido e o máximo pré-aquecimento possível variando exclusivamente a pressão existente na cavidade.

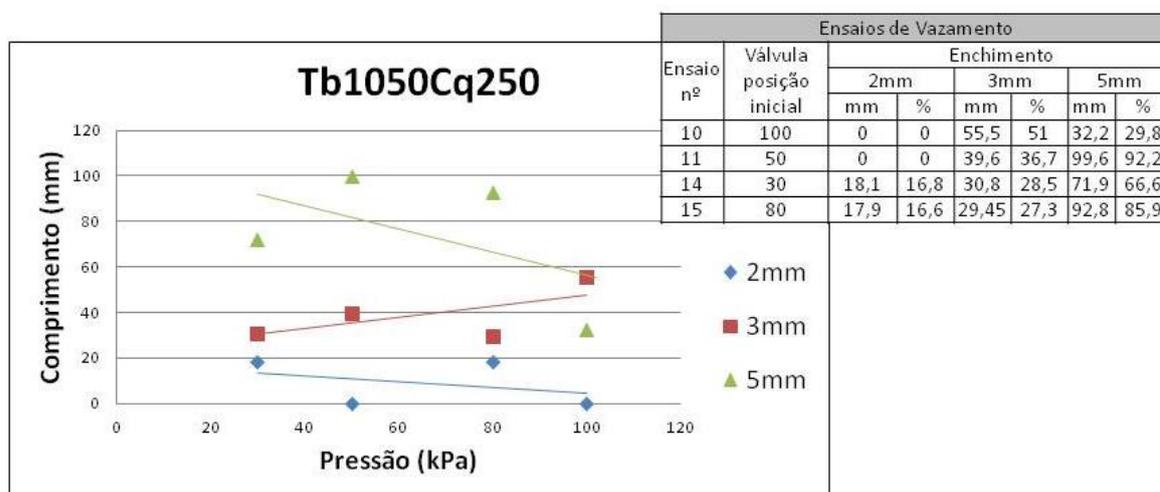


Gráfico 17: Variação do comprimento da vareta com a pressão interna da coquilha para uma temperatura de vazamento a 1050°C e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3)

Nas varetas de 2 e 5mm é possível verificar que há um aumento no tamanho das varetas, ao contrário do que acontece com as de 3mm onde há uma redução. Estas variações são resultado de o metal ser distribuído unicamente por uma bacia.

Após alterar a temperatura de 1050°C para 1100°C e mantendo a coquilha a 250°C, os resultados obtidos foram os seguintes (Gráfico 18):

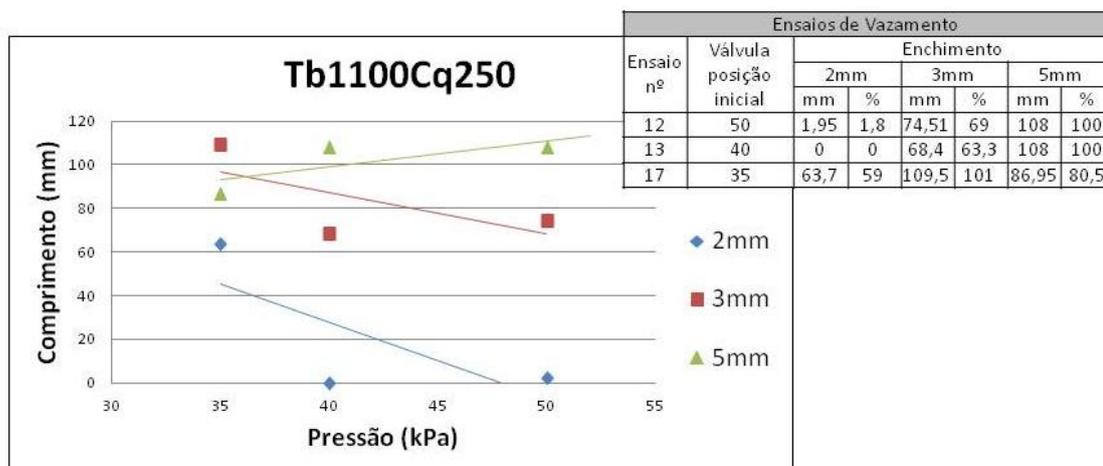


Gráfico 18: Variação do comprimento da vareta com a pressão interna da coquilha para uma temperatura de vazamento a 1100°C e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3)

Neste caso os resultados mostram melhorias para as espessuras mais estreitas e o contrário nas varetas de 5mm. Ao contrário do esperado quando as secções são mais largas o vácuo aumenta a probabilidade da separação do metal e com o aumento da temperatura do metal líquido esse facto acaba por se consumir.

Temperatura do bronze

Ao aumentar a temperatura do bronze a sua viscosidade diminui permitindo um melhor preenchimento. Ao definir o intervalo de entre 30 e 40kPa da pressão foi possível observar o comportamento a diferentes temperaturas (Gráfico 19) e verificar se o metal líquido separava durante o vazamento.

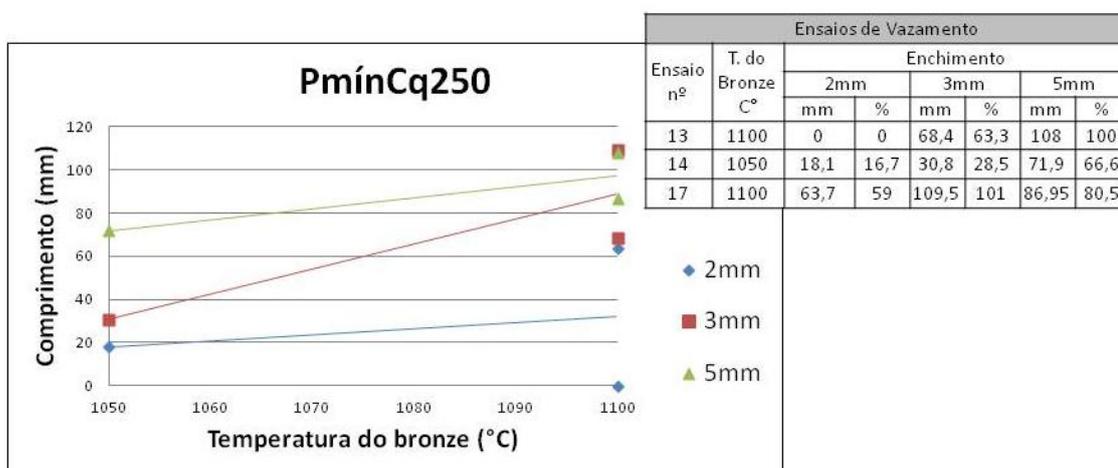


Gráfico 19: Variação do comprimento da vareta com a temperatura de vazamento para um intervalo de pressão interna na coquilha de 30kPa a 40kPa e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3).

Ao trabalhar a baixa pressão a possibilidade de separação do metal líquido durante o vazamento aumenta. Em contrapartida foi constatado que mesmo assim o aumento da temperatura do bronze melhora o preenchimento.

No procedimento seguinte fez-se a comparação do comportamento para as diferentes temperaturas de vazamento a um intervalo de pressões intermédias 50 a 80kPa.

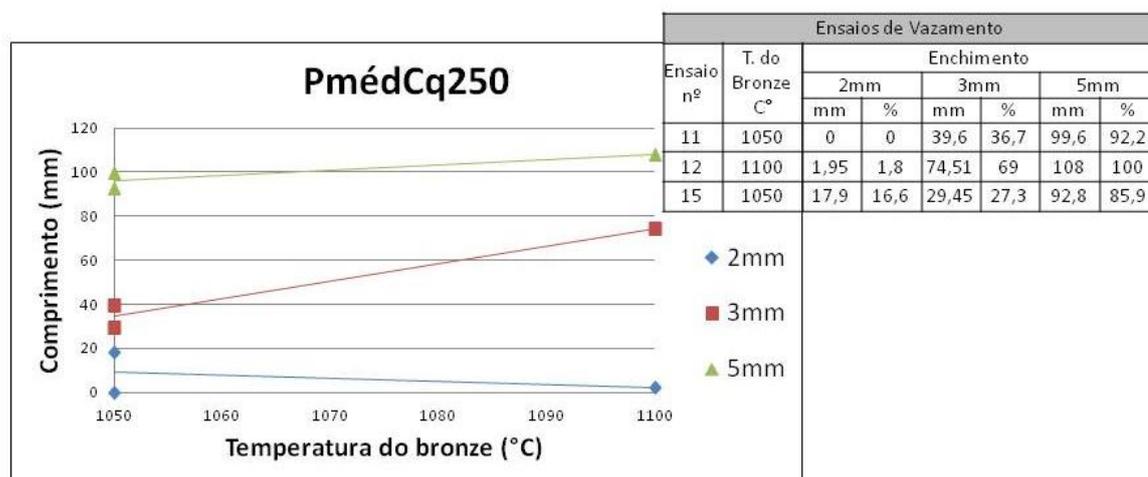


Gráfico 20: Variação do comprimento da vareta com a temperatura de vazamento para um intervalo de pressão interna na coquilha de 50kPa a 80kPa e um pré-aquecimento da coquilha de 250°C (Fase 3).

Contrariamente ao espectável o aumento de temperatura não gerou varetas de 2mm, por outro lado a tendência de aumento de preenchimento foi verificada nas restantes, por sua vez as restantes dimensões seguiram a tendência normal, ou seja, melhoraram o preenchimento com o aumento da temperatura.

A última sessão de ensaios pretendeu testar a influência da selagem da coquilha, dos três testes efetuados o refratário não foi removido nem repostado. Durante estes ensaios não foi acionada a bomba de vácuo e a temperatura do bronze foram fixadas a 1150°C e 250°C respetivamente. A película criada pelo refratário impedia a união das moldações, permitindo dessa forma a entrada ou saída de gases pelo plano de apartação durante o vazamento. Com a evolução dos testes a película tendia a desaparecer reduzindo a circulação de gases. Os resultados do Gráfico 21 juntamente com a observação da coquilha permitiram dissipar algumas dúvidas existentes.

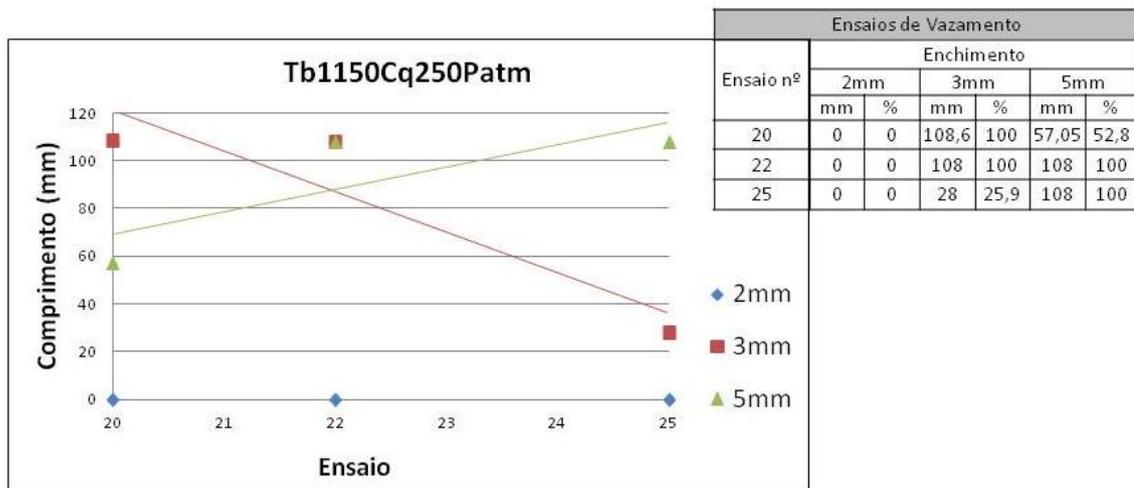


Gráfico 21: Variação do comprimento da vareta no tempo sem reposição de tinta refratária para uma de pressão interna na coquilha de 100kPa, pré-aquecimento da coquilha à temperatura de 250°C e temperatura de vazamento a 1150°C (Fase3)

Esta parte final da terceira fase de ensaios permitiu verificar situações diferentes nas três dimensões diferentes das varetas:

- 2mm – Sem o acionamento da bomba não foi possível obter amostras desta espessura.
- 3mm – Com a redução de refratário a probabilidade de obter varetas diminuiu.
- 5mm – Ao contrário do diâmetro anterior a falha de refratário continua a permitir a obtenção de varetas completas.

Finalmente é possível afirmar que entre 2 e 5mm se está na fase de transição entre a influência das características do refratário e da separação do metal líquido. A utilização de baixa pressão permite alguns resultados a explorar no futuro para secções estreitas.

Fase 4

Os ensaios desta fase foram realizados numa moldação antiga. A preparação da moldação não foi alvo de cuidados especiais, somente foi limpa a camada de óxidos e colocado ou reposto o refratário para os vazamentos. O equipamento permitia obter uma vareta de 150mm por ensaio, a união das faces internas não era possível devido à concavidade existente e, por fim, só eram possíveis vazamentos à pressão atmosférica.

A última fase ocorreu em simultâneo com os três últimos ensaios da fase anterior e pretendia dissipar as dúvidas sobre o escoamento de gases. Neste equipamento foram efetuados 7 ensaios, cujo resultado está ilustrado no Gráfico 22.

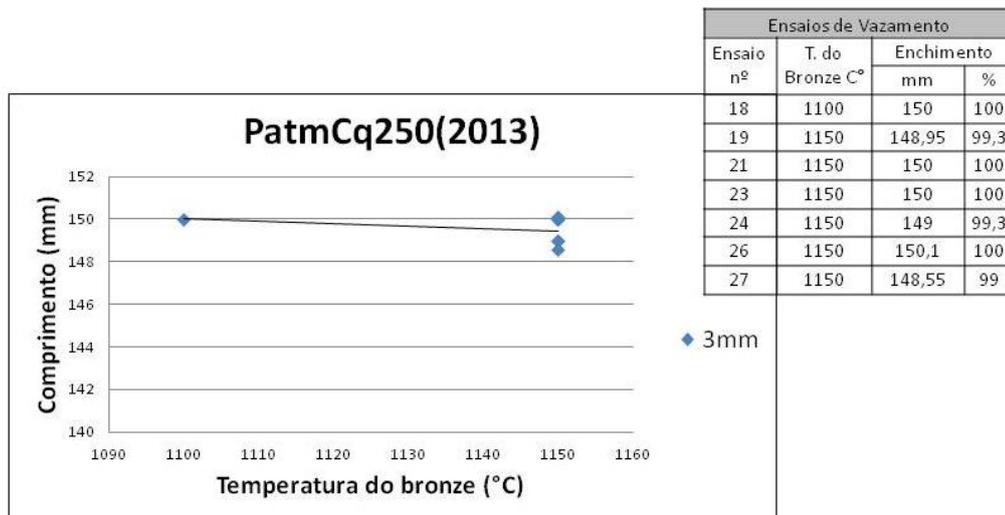


Gráfico 22: Variação do comprimento da vareta no tempo com a temperatura de vazamento, à pressão atmosférica e pré-aquecimento da coquilha à temperatura de 250°C (Fase4)

Na Figura 47 mostra-se o aspeto final de uma vareta produzida com utilização de vácuo (Fase 2) e com a coquilha usada na Fase 4. A maior irregularidade e as rebarbas existentes na vareta produzida na Fase 4 mostra que o enchimento destas peças resulta da dificuldade em extrair o ar da cavidade de vazamento.

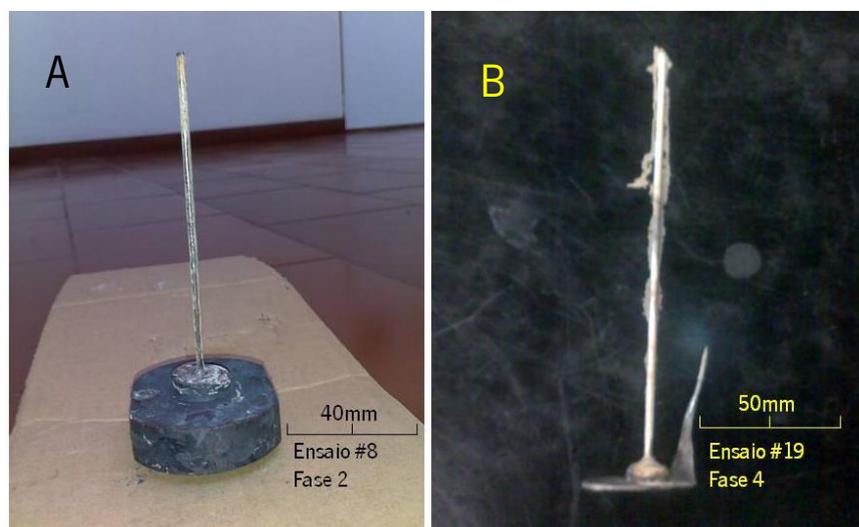


Figura 47 – A) Ensaio 8; B) - Ensaio 19

A diferença do tipo de acabamento é evidente, na coquilha antiga houve um escoamento de bronze pelo plano de separação, obrigando a trabalho posterior para ser efetuada o acabamento. Já a coquilha inicial originou uma vareta pronta a ser usada.

6.3. Comparação dos ensaios numéricos e práticos

A comparação de resultados entre a análise numérica e a prática está assente na terceira fase, nos vazamentos da coquilha de 3 varetas. A comparação seguiu a ordem das variáveis analisadas dos ensaios numéricos. É importante salientar que a análise numérica apenas dá valores percentuais, como forma de realizar a comparação dos resultados os valores dos ensaios práticos foram convertidos em percentagens de preenchimento das varetas.

Efeito da pressão interna na coquilha

A pressão é a variável que se pretende testar neste trabalho, onde foram fixadas as temperaturas do bronze a 1050°C e a moldação e bacia a 250°C. Ao analisar o Gráfico 23 é possível verificar uma grande divergência de resultados entre a componente prática e numérica, ainda assim há uma tendência de melhoria de preenchimento nas varetas de 2mm quando se utiliza vácuo.

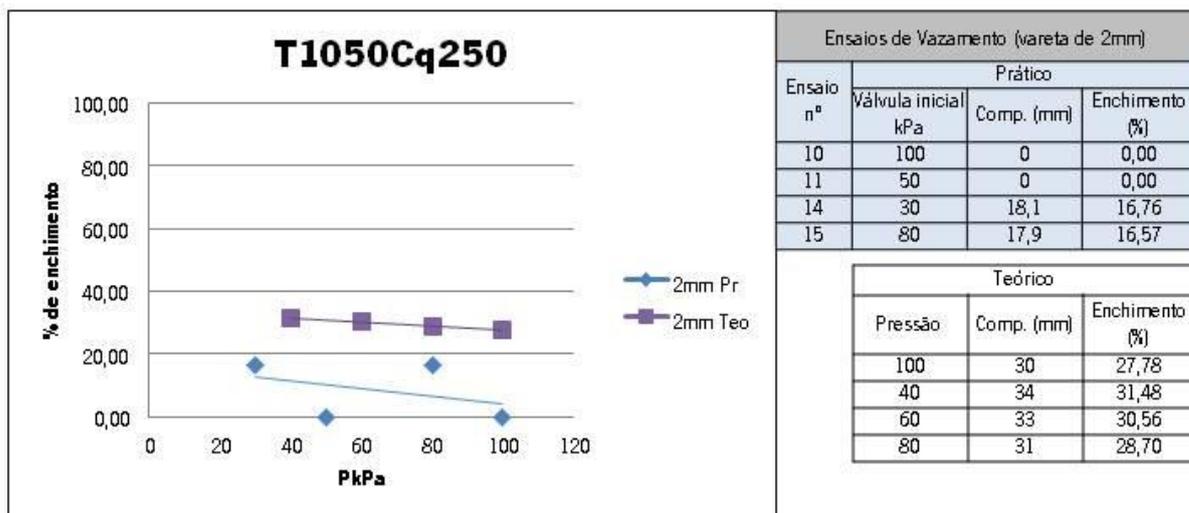


Gráfico 23: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1050°C (Fase3 - 2mm)

Na vareta de 3mm, a análise numérica apresenta um comportamento linear, no entanto nos ensaios práticos a utilização do vácuo reduziu a percentagem de preenchimento (Gráfico 24).

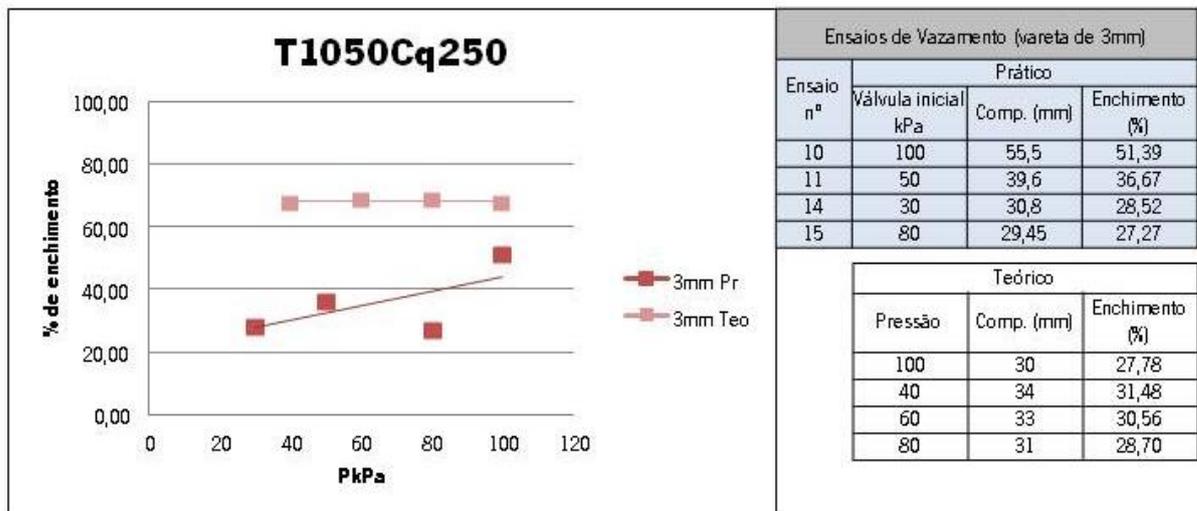


Gráfico 24: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1050°C (Fase3 - 3mm)

Ao analisar os dados do Gráfico 25 era previsível um enchimento completo, na prática não se conseguiu nenhum enchimento completo. De frisar que neste caso também há melhorias com a introdução do vácuo.

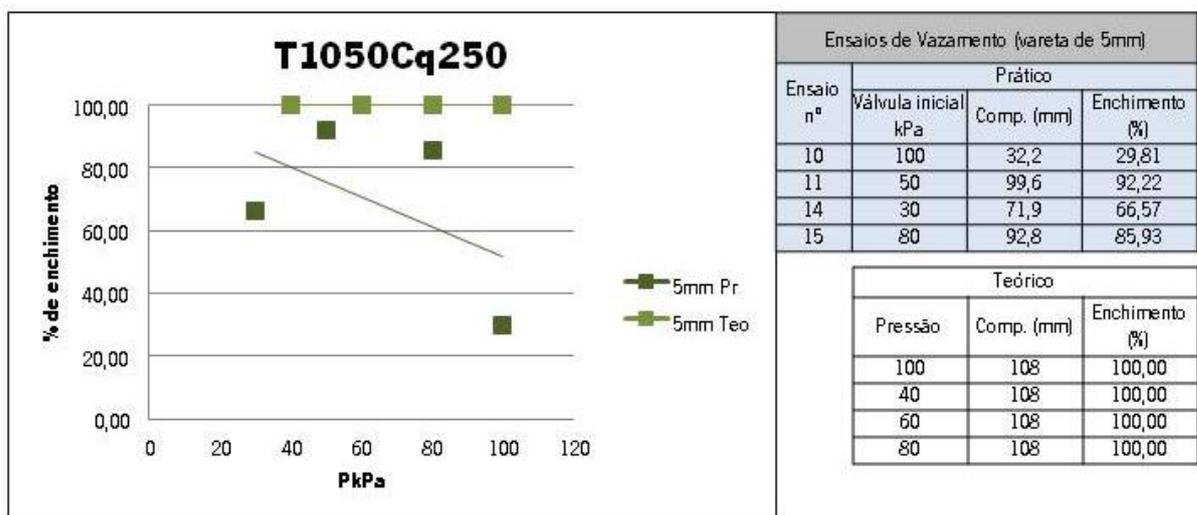


Gráfico 25: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1050°C (Fase3 - 5mm)

Ao aumentar a temperatura de sobreaquecimento, teoricamente, é esperado um maior enchimento nas varetas. Os ensaios práticos confirmam a tendência de um melhor preenchimento.

Nas varetas de 2mm aliar um aumento do sobreaquecimento do bronze com o vácuo permite obter melhores resultados como ilustra o Gráfico 26, apesar de numericamente a tendência ser linear com um enchimento previsto de 40%.

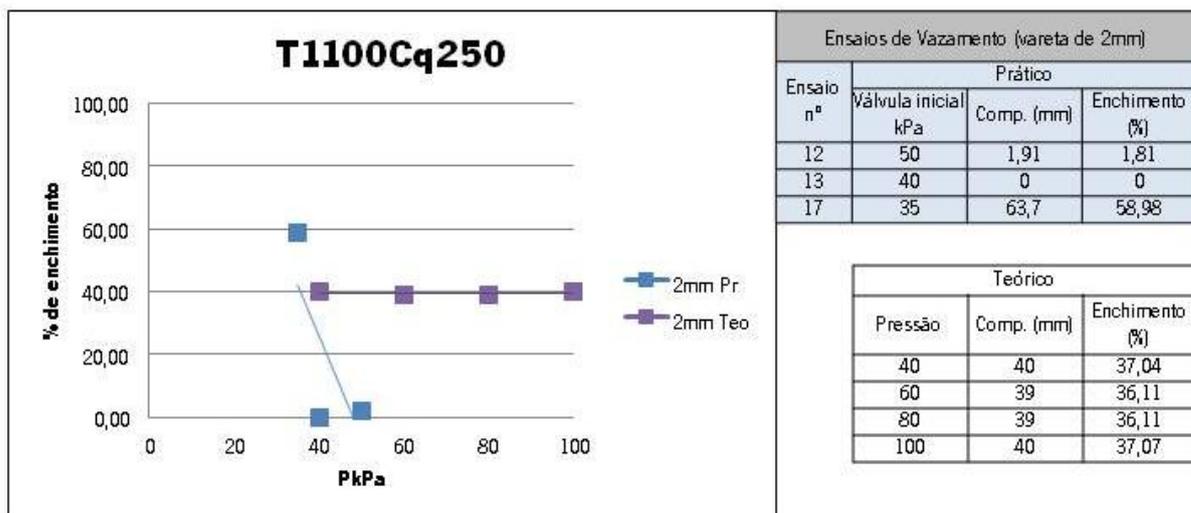


Gráfico 26: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1100°C (Fase3 - 2mm)

Na vareta de 3mm, também um maior sobreaquecimento e a utilização do vácuo revelaram melhores resultados (Gráfico 27).

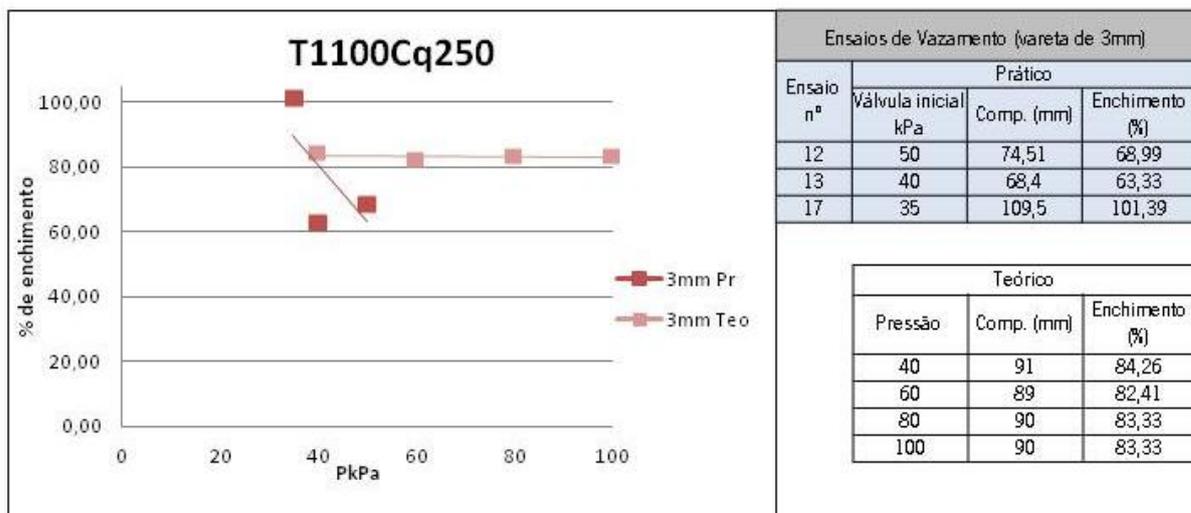


Gráfico 27: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1100°C (Fase3 - 3mm)

Na vareta de 5mm a análise numérica prevê varetas completa, já no ensaio prático com a bomba de vácuo aberta no máximo originou uma vareta incompleta, ainda assim o enchimento foi superior a 80% (Gráfico 28).

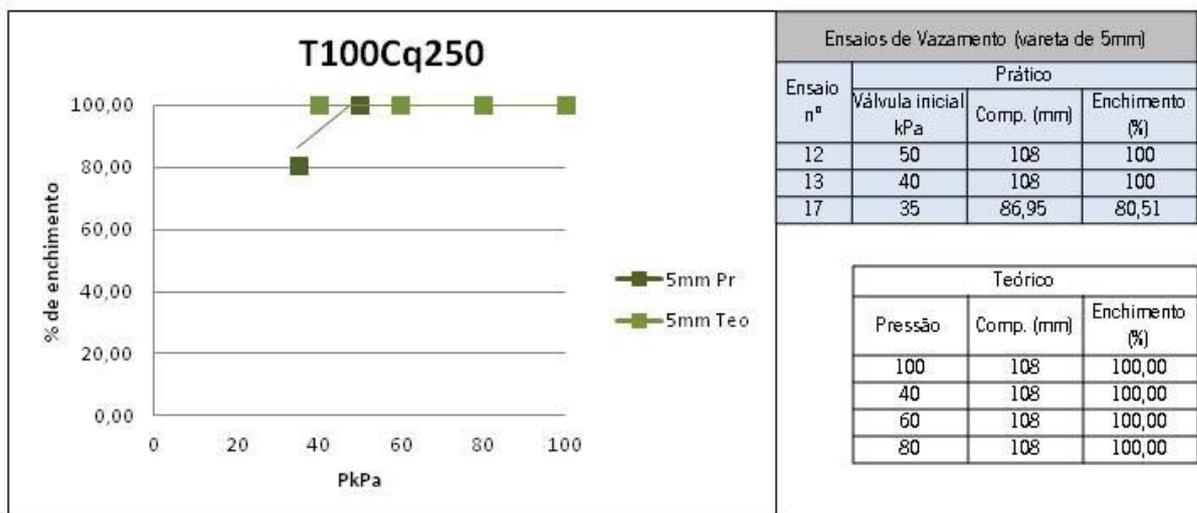


Gráfico 28: Variação da % de enchimento da coquilha com pressão interna da coquilha, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e temperatura de vazamento de 1100°C (Fase3 – 5mm)

Temperatura de vazamento do bronze

O sobreaquecimento, quando usado dentro dos limites estabelecidos, é uma vantagem no preenchimento de detalhes em fundição.

Com uma pressão de 40kPa e com a variação da temperatura de vazamento conseguiu-se obter alguns enchimentos na vareta de 2mm, o que não acontecia à pressão atmosférica. Os resultados estão apresentados no Gráfico 29.

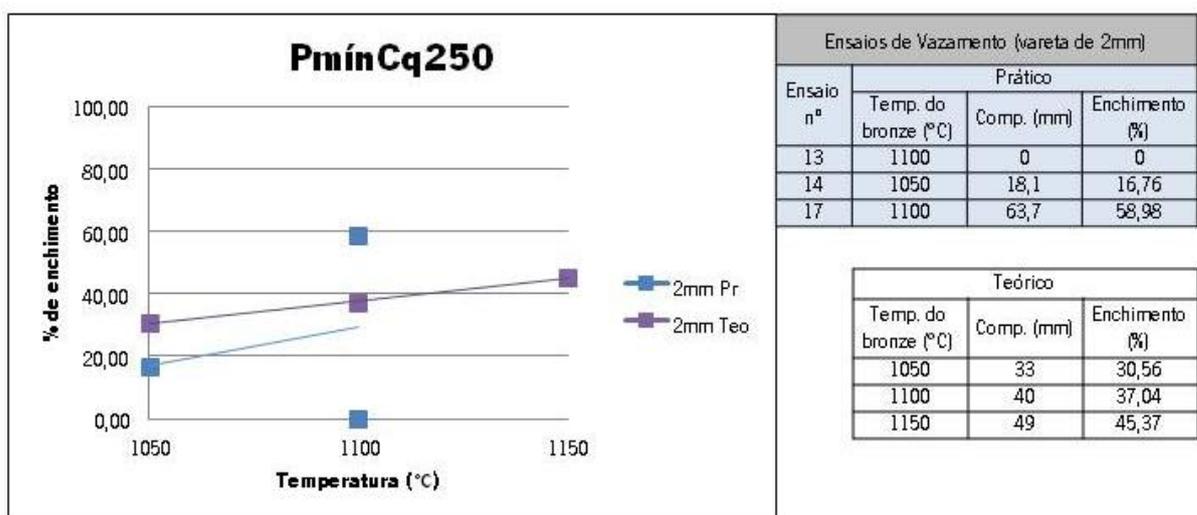


Gráfico 29: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e pressão interna da coquilha de 40kPa (Fase3 – 2mm)

Na vareta de 3mm a melhoria é evidente tendo conseguido uma vareta completa a 1100°C, conforme se pode observar no Gráfico 30.

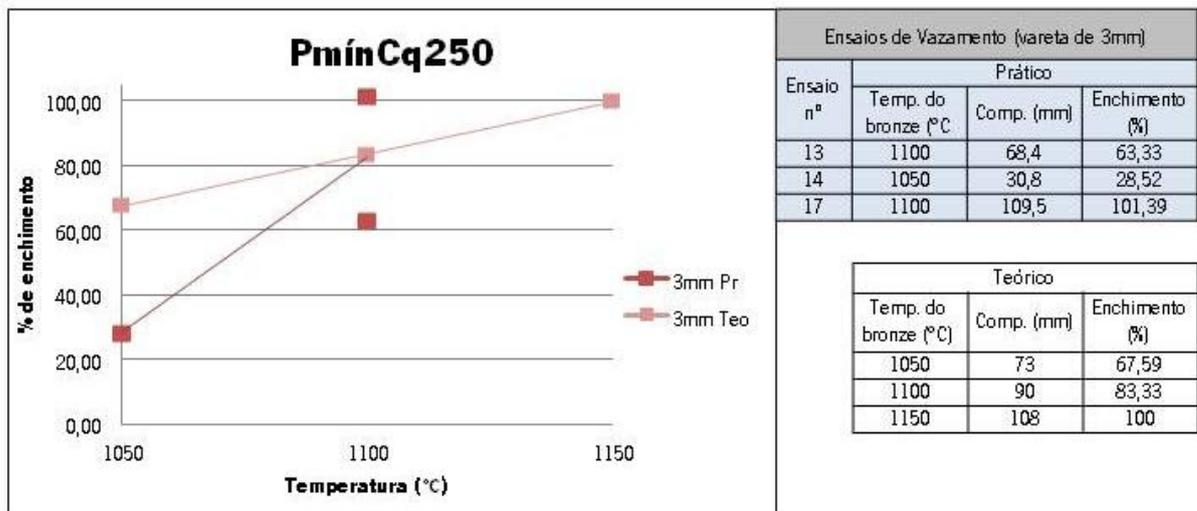


Gráfico 30: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e pressão interna da coquilha de 40kPa (Fase3 - 3mm)

Quanto às varetas de 5mm, pela análise numérica, seria previsível obter preenchimentos totais independentemente da temperatura de vazamento. Na prática apenas a 1100°C se conseguiu obter um enchimento a 100%

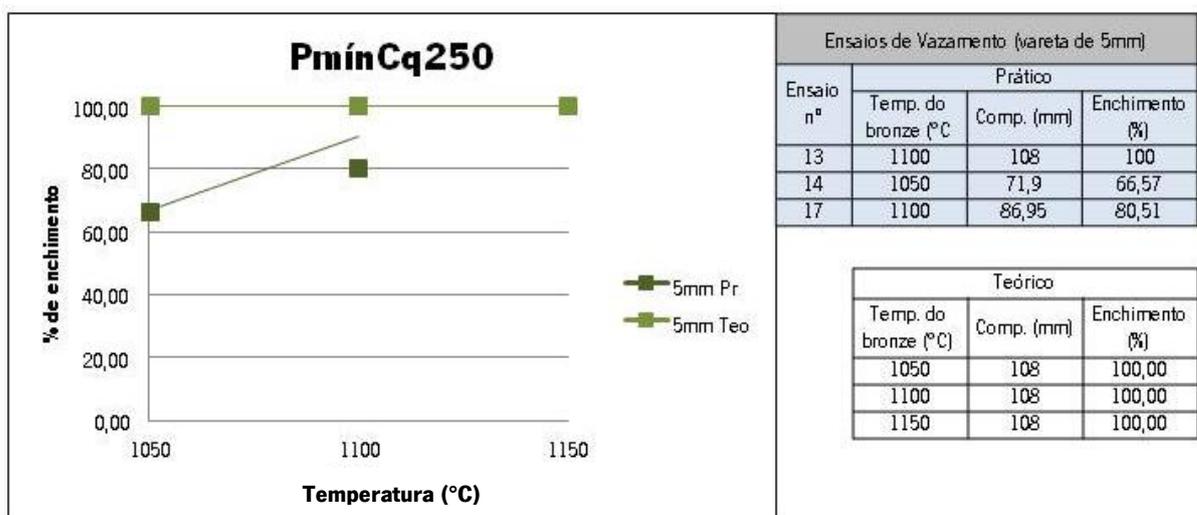


Gráfico 31: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e pressão interna da coquilha de 40kPa (Fase3 - 5mm)

Subindo a pressão para um intervalo compreendido entre 50 e 80 kPa, foi visível a dificuldade em conseguir algum preenchimento na vareta de 2mm, como mostra o Gráfico 32. Numericamente seria previsível uma melhoria com o aumento do sobreaquecimento.

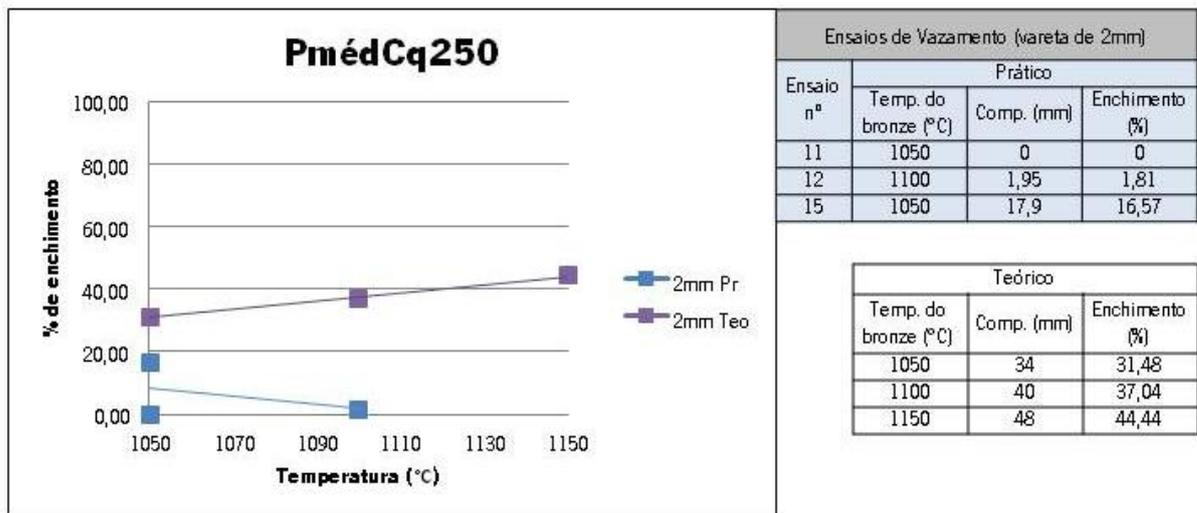


Gráfico 32: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e um intervalo na pressão interna da coquilha de 50kPa e 80kPa (Fase3 - 2mm)

O Gráfico 33 mostra que os ensaios práticos acompanham a tendência dos ensaios numéricos, havendo uma melhoria de preenchimento com o sobreaquecimento na vareta de 3mm.

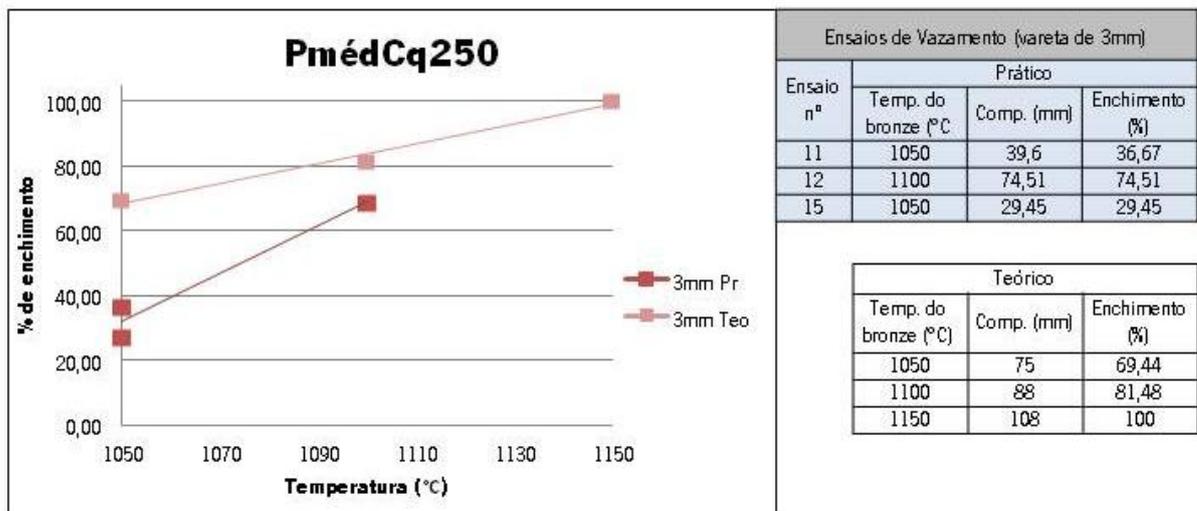


Gráfico 33: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e um intervalo na pressão interna da coquilha de 50kPa e 80kPa (Fase3 - 3mm)

Por fim as varetas de 5mm tiveram sempre enchimentos acima dos 80% como prova o Gráfico 34, teoricamente este diâmetro não oferece dificuldades às temperaturas de vazamento analisadas, onde se previam resultados de 100%.

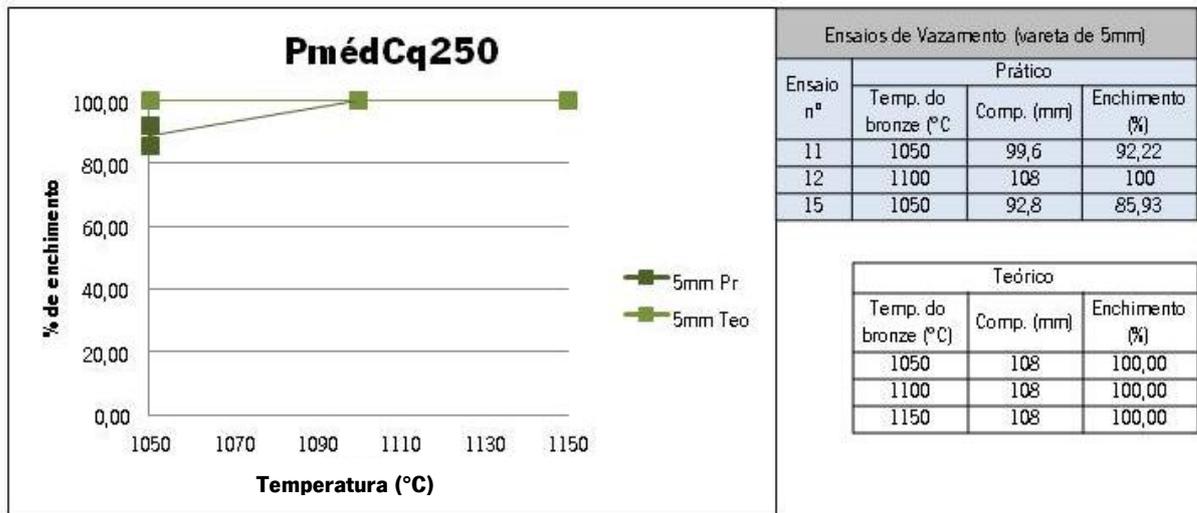


Gráfico 34: Variação da % de enchimento da coquilha com a temperatura de vazamento, para uma temperatura de pré-aquecimento da coquilha e da bacia de 250°C e um intervalo na pressão interna da coquilha de 50kPa e 80kPa (Fase3 – 5mm)

Ao confrontar os resultados práticos com os teóricos de uma forma geral os resultados seguem tendências comuns. Nalguns testes verificou-se existir alguma divergência entre o modelo teórico e os resultados práticos podem justificar-se pela irregularidade do revestimento refratário (mais significativo para os menores diâmetros), presença de partículas de escória no metal, etc. Destes resultados pode-se concluir que, inequivocamente, o sobreaquecimento do metal líquido é benéfico para o processo. Já a utilização da baixa pressão é boa para o preenchimento do detalhe, mas para espessuras maiores pode proporcionar a separação do metal líquido.

6.4. Análise de Amostras (Fase 2)

Após realizados 9 vazamentos, onde alguns ensaios permitiram obter as primeiras varetas completas ($\approx 108\text{mm}$), efetuou-se a análise metalográfica com o intuito de verificar a influência da aplicação do vácuo.

Da segunda fase foram selecionadas 4 varetas dos ensaios 3; 6; 8 e 9, onde se efetuou o controlo de algumas variáveis e se apontaram as primeiras características visíveis no imediato.

- Ensaio 3 – pressão atmosférica;
Formou uma vareta completa e sã.
- Ensaio 6 – pressão a 80kPa;
Originou uma vareta completa e espalmada na orientação do plano de apartação. O bronze penetrou 3.8mm o canal de vácuo.

- Ensaio 8 – pressão atmosférica;
A vareta obtida tem falhas na superfície provocadas pelo refratário e tem 100,2mm de comprimento devido a acumulação de refratário na base da cavidade moldante.
- Ensaio 9 – pressão 40kPa;
Formou uma vareta com uma estricção. O bronze penetrou 12mm no canal de vácuo.

O procedimento de preparação foi realizado nas etapas abaixo descritas:

Seleção de secções para amostra:

Nesta etapa inicial foram selecionadas as varetas de onde se retiraram três amostras de cada, que representam a base (B), centro (C) e topo (T) (Figura 48).

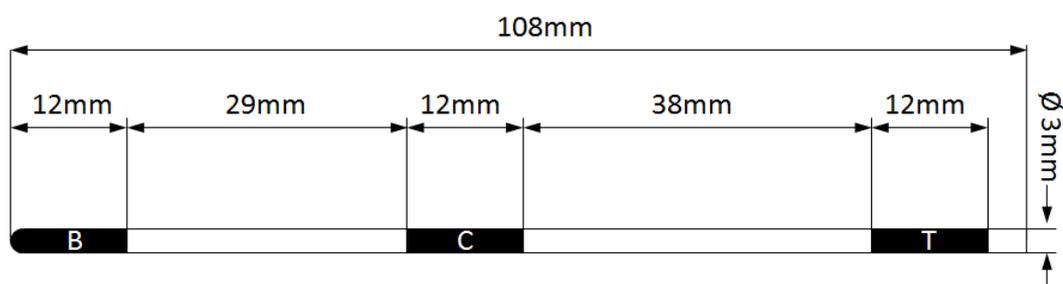


Figura 48: Seleção de amostras

As marcações nas varetas foram realizadas da base para o topo. O principal critério na seleção das amostras foi verificar a interferência do vácuo em pontos considerados cruciais; T- junto da bacia de vazamento; C- no centro e B- junto da saída de ar (ligação à bomba de vácuo).

Corte

Na operação de corte foi utilizada uma serra manual indicada para corte de chapa de fina (TPI 24), uma vez que o bronze é uma liga frágil e as peças eram esbeltas e havia o risco de se quebrarem. Para evitar o esmagamento das amarras metálicas no aperto do torno de bancada, as amostras foram protegidas com papel e cartão.

Preparação

As amostras foram preparadas numa solução de resina e catalogadas conforme a Tabela 27 com a orientação de descida de vazamento. O preparado da vareta 6 apenas tinha 2 amostras, uma vez que o topo não ficou viável para análise, conforme mencionado anteriormente.

A Figura 49 mostra as imagens microscópicas retiradas da amostra 3 e a Figura 50 corresponde à amostra 9. A vareta que deu origem à amostra 3 foi vazada à pressão atmosférica, que originou uma estrutura com grãos de grandes dimensões, enquanto a amostra 9, cujo vazamento foi realizado a 40kPa, originou uma estrutura de pequenos grãos e porosidades junto à base da vareta.

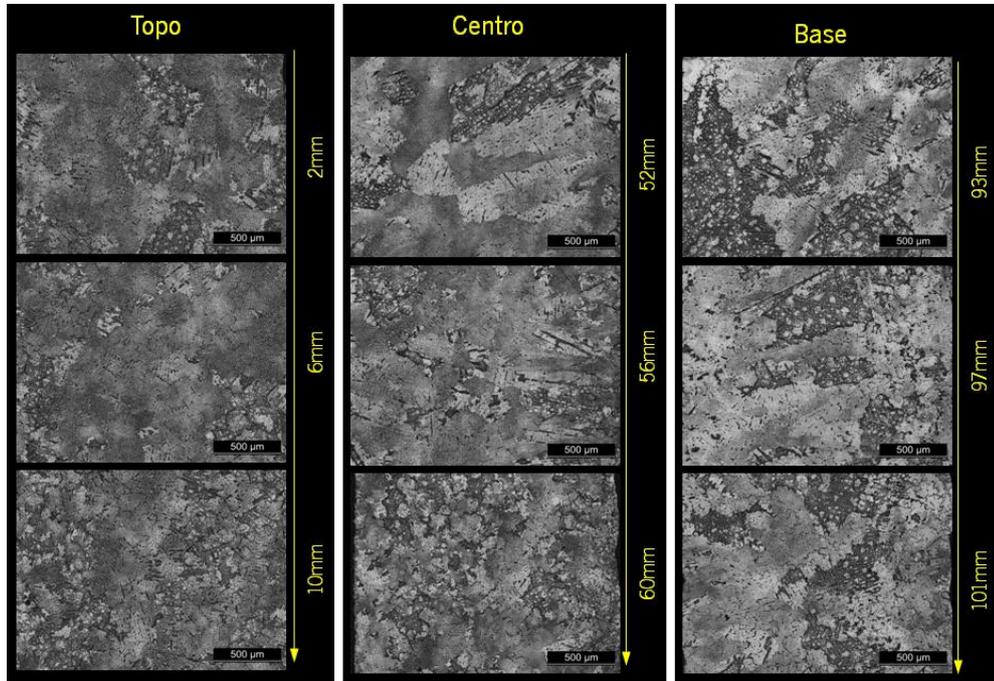


Figura 49: Imagens microscópicas da amostra 3 (100kPa)

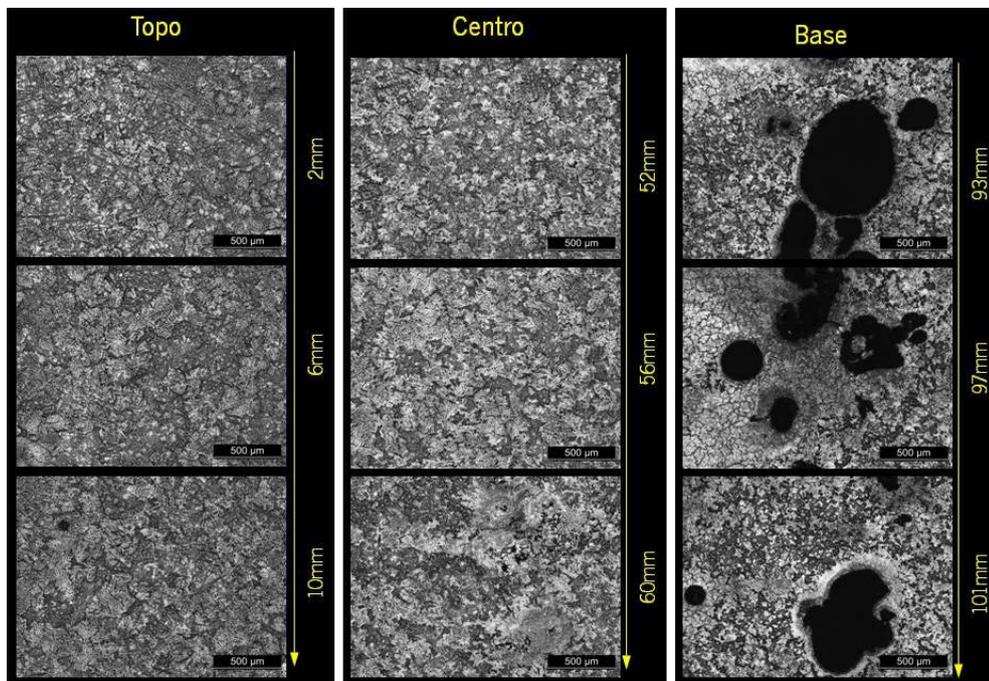


Figura 50: Imagens microscópicas da amostra 9 (40kPa)

Para um melhor percepção as imagens podem ser consultadas no Anexo VI.

Microdureza

A microdureza foi testada no equipamento da marca *Shimadzu*, modelo *Type M*. Após a realizados os testes das e às amostras 3 e 9 foi construída a Tabela 28. O objetivo era verificar se a utilização de vácuo interferia na dureza das varetas. A carga utilizada foi de 200g durante 15s.

Tabela 28: Ensaios de microdureza

Posição (mm)		Base			Centro			Topo		
		101	96	92	60	55	51	10	5	1
Amostra 3	Dureza (HV)	231,8	231,8	243,8	231,8	243,8	243,8	237,7	243,8	231,8
Amostra 9	Dureza (HV)	266,6	263,7	260,9	231,8	231,8	231,8	243,8	246,4	256,8

As amostras 3 e 9 correspondem ao vazamento à pressão atmosférica e à pressão de 40kPa respectivamente. O Gráfico 35 mostra que há um ligeiro aumento de dureza ao longo da vareta quando se usa vácuo durante o vazamento. Já no vazamento à pressão atmosférica há um ligeiro decréscimo ainda assim pouco significativo.

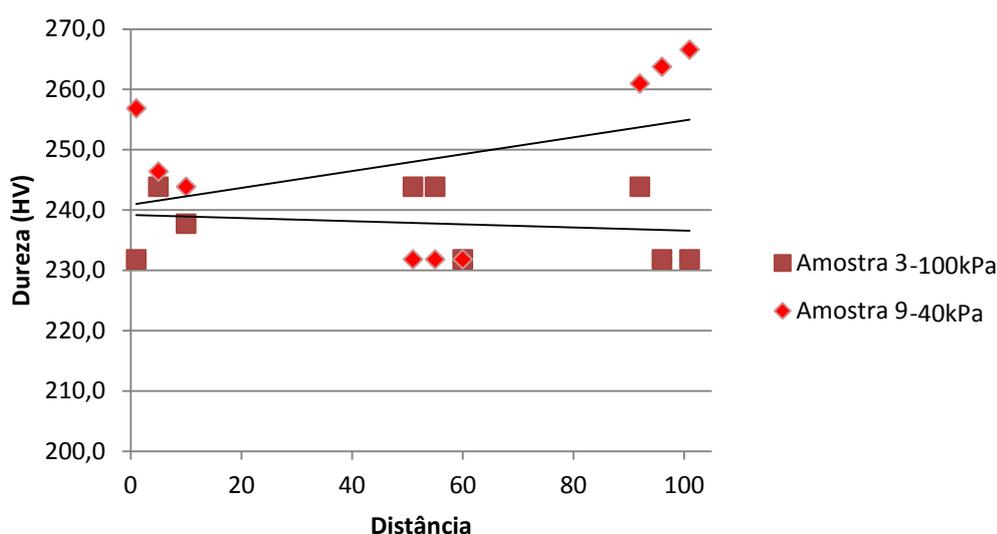


Gráfico 35: Ensaios de microdureza

Os resultados obtidos nos ensaios de microdureza não foram conclusivos, sobretudo pela oscilação de resultados na amostra 9.

Análise química (depois dos vazamentos)

Durante os trabalhos práticos foram usados 2 lingotes diferentes. Tradicionalmente em fundição há alterações na composição química do lingote para o produto final, no caso dos bronzes de estanho há uma ligeira redução na percentagem de estanho. No Laboratório de Metalurgia do

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho foram realizadas as análises no equipamento *Philips X'Unique II* aos lingotes e a duas amostras de duas das peças finais. Das diferentes normalizações existentes foi utilizada a numeração atribuída pela CDA (*Copper Development Association*).

A Tabela 29 corresponde aos valores obtidos das análises do primeiro lingote e das respetivas peças.

Tabela 29: Composição química do lingote e primeira fase de vazamentos

	Componente químico	Liga C92800		Lingote analisado		Análise da peça	
		Min (%)	Máx (%)	Conc. (%)	Erro absoluto (%)	Conc. (%)	Erro absoluto (%)
1	Al	-	0.005	-	-	-	-
2	Cu	78	82	79.2	0.1	79.8	0.01
3	Fe	-	0.20	0.0310	0.002	-	-
4	Ni	-	0.8	0.0377	0.002	-	-
5	P	-	0.05	0.0523	0.003	-	-
6	Pb	4	6	2.44	0.02	2.72	0.02
7	S	-	0.05	-	-	-	-
8	Sb	-	0.25	-	-	-	-
9	Si	-	0.005	-	-	-	-
10	Sn	15	17	17.4	0.06	17.5	0.06
11	Sr	-	-	0.167	0.003	-	-
12	Zn	-	0.8	0.684	0.004	-	-

O lingote utilizado nos 13 primeiros vazamentos corresponde ao grupo dos bronzes de estanho e chumbo e pertence à liga normalizada C92800 [9]. Em relação ao bronze convencional (cobre e estanho) tem uma adição de chumbo e nalguns casos também de zinco.

A Tabela 30 corresponde ao segundo lingote e à segunda fase de ensaios. Como é possível verificar diferença principal é quantidade residual de chumbo face ao primeiro lingote.

Tabela 30: Composição química do lingote e segunda fase de vazamentos

	Componente químico	Liga C91300		Lingote analisado		Análise de peça	
		Min (%)	Máx (%)	Conc. (%)	Erro absoluto (%)	Conc. (%)	Erro absoluto (%)
1	Al	-	0.005	-	-	0.0161	0.006
2	Cu	79	82	81.4	0.1	81.9	0.1
3	Fe	-	0.25	-	-	-	-
4	Ni	-	0.5	-	-	-	-
5	P	-	1	0.0460	0.003	0.0482	0.002
6	Pb	-	0.25	0.210	0.005	0.237	0.006
7	S	-	0.05	-	-	-	-
8	Sb	-	0.20	-	-	-	-
9	Si	-	0.005	-	-	0.0157	0.006
10	Sn	18	20	17.8	0.06	17.8	0.06
11	Zn	-	0.25	0.623	0.004	-	-

A segunda fase de vazamentos foi efetuada com um lingote do grupo dos bronzes de estanho, este material é constituído essencialmente de cobre e estanho e a percentagem de cobre é sempre superior a 80%. Após a análise foi concluído que o material pertence à norma C91300 [9].

Em ambos os casos não houve alterações significativas na composição química. Esta condição é vantajosa para o sucesso do processo, uma vez que um dos requisitos exigidos era garantir a composição química.

7. Conclusões

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível constatar que a utilização de ambiente de baixa pressão no interior da coquilha é benéfico, sobretudo quando se trabalha com sobreaquecimento baixo. Ainda assim foram detetadas algumas falhas, devido à quantidade de variáveis a gerir.

Ao concentrar os resultados no estudo das variáveis é possível concluir que:

- i. Vácuo – O vácuo torna-se vantajoso no processo utilizado, porque apenas em ambiente de baixa pressão se obtiveram preenchimentos na vareta de 2mm. Também é benéfico em temperaturas de vazamento mais baixas, devido à maior dificuldade na separação do metal líquido.
- ii. Temperatura de vazamento – O aumento da temperatura de vazamento permite uma melhor distribuição do metal, por outro lado também causou algumas dificuldades adicionais, devido à libertação de gases.
- iii. Refratário – Sem este elemento não seriam possíveis ensaios com sucesso conforme verificado na primeira fase. No entanto para melhorar os resultados, o refratário deve ser removido a cada utilização e recolocar uma camada o mais uniformemente possível.
- iv. Temperatura da bacia de vazamento e coquilha – Foi provado aquecer a bacia separadamente do restante da moldação não traz vantagens adicionais. Porém foi verificado, que pré-aquecer os dois componentes à temperatura máxima aconselhada garantem melhores resultados.
- v. Quantidade de bronze na bacia de vazamento – Esta componente, apesar de não fazer parte dos objetivos iniciais, também não é relevante, sendo provada esta situação, quando se realizaram vazamentos na coquilha antiga onde a bacia de vazamento tem um volume reduzido.

Os gases libertados durante o vazamento foram um obstáculo que não se conseguiu ultrapassar durante a realização dos ensaios práticos, como forma de solucionar esse problema foi modelada uma nova moldação em câmara de baixa pressão, que se encontra no planeamento futuro. Para reduzir o aparecimento de gotas de bronze devido à separação do metal líquido, foi proposta uma alternativa que passa pela utilização do vácuo progressivo. A falta de fornecimento de bronze individualizado para cada uma das varetas condiciona a sua distribuição, neste campo a coquilha em câmara de baixa pressão deve solucionar o problema pelas alterações de conceção efetuadas.

Por fim, e não menos importante, foi conseguir garantir a composição química pretendida das varetas.

8. Trabalhos futuros

Aplicação de vácuo progressivo

Na moldação de 3 varetas utilizada a remoção de ar está direcionada para a caixa que foi aberta na parte inferior, esta situação causa uma sucção do metal líquido aumentando o efeito de criação de gota. A solução proposta para a resolução do problema será a introdução de uma válvula adicional que permita retirar o ar de forma progressiva da moldação.

Coquilha em câmara de baixa pressão

Outra solução apresentada obriga a uma total reformulação do conceito implementado na moldação utilizada. A utilização da coquilha de baixa pressão foi abordada nas alternativas, esta versão impede a selagem da moldação em si, permitindo a dissipação dos gases pelo plano e apartação à imagem do sucedido na coquilha antiga.

Coquilha inclinada

Durante o vazamento uma ligeira inclinação da coquilha impede a criação de gota, mantendo desta forma o metal líquido unido.

Utilização de folha de alumínio

A utilização da chapa de estanho de 1mm nos primeiros ensaios revelou-se contraproducente, devido ao tempo que demorava a fundir. A resolução do problema passa pela utilização de folha de alumínio, esta hipótese foi testada para calibrar o vácuo e revelou-se ser suficiente para selar a coquilha.

Bibliografia

- [1] J. M. G. d. C. Ferreira, *Tecnologia da Fundição*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 1999.
- [2] Commission Nationale de la Formation Professionnelle du Syndicat Général des Fondeurs de France, *Technologie de la Fonderie en Moules Métalliques*, 3ª Edição ed., Paris: Éditions Techniques des Industries de la Founderie, 1984, p. 49.
- [3] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook - Casting*, vol. 15, A. International, Ed., Ohio: ASM International, 2002.
- [4] National Park Service - U.S. Department of the Interior, "Liberty Bell Center," Experience Your America, 04 Abr 2014. [Online]. Available: <http://www.nps.gov/inde/liberty-bell-center.htm>. [Acedido em 08 Jul 2014].
- [5] A. P. d. Fundição, Realizador, *Associação Portuguesa de Fundição*. [Filme]. Associação Portuguesa de Fundição.
- [6] Associação Nacional da Indústria de Moldes, "A Indústria Portuguesa de Moldes," Associação Nacional da Indústria de Moldes, Marinha Grande, 2013.
- [7] Tegra Corporation, "PERMANENT MOLD CASTING," Tegra Corporation, 2010. [Online]. Available: <http://www.tregacorp.com/products.html>. [Acedido em 10 Jul 2014].
- [8] M. I. Finley, *Early Greece: The Bronze and Archaic Ages*, Edição revista 1981 ed., Norton, Ed., Nova Iorque: Norton, 1970.
- [9] J. R. Davis, *Copper and Copper Alloys*, Ohio: Materials Park, Ohio ASM International, 2001.
- [10] Copper Development Association Inc, *Copper Casting Alloys*, Nova York, Nova York: Copper Development Association Inc, 1994.
- [11] A. Borges e H. Rosa, *Histórias secretas de reis portugueses*, Lisboa: Casa das Letras, 2012, p. 162.
- [12] G+J Portugal - Edições, Publicidade e Distribuição, Lda., "Toques afinados," *Super Interessante*, vol. 171, n.º Os últimos mestres sineiros portugueses, Jul 2012.

- [13] Palácio Nacional de Mafra, “Carrilhões,” Palácio Nacional de Mafra, 8 Jul 2014. [Online]. Available: <http://www.palaciomafra.pt/pt-PT/basilicamenu/carrilhoesmenu/ContentList.aspx>. [Acedido em 9 Jul 2014].
- [14] Controlinveste Conteúdos S.A., “Portugal entre os países com maior reserva de ouro,” *Jornal de Notícias*, n.º Economia, 21 Abr 2012.
- [15] F. R. Sias, *Lost-wax Casting: Old, New, and Inexpensive Methods*, Pendleton, Carolina do Sul: Woodsmeer Press, 2005.
- [16] T. S.r.l., “Topcast Engineering - Products - TCE - Vacuum Centrifugal Casting Machine,” Blobber, 2014. [Online]. Available: <http://www.topcast.it/tce/>. [Acedido em 27 09 2014].
- [17] Commission Nationale de la Formation Professionnelle du Syndicat Général des Fondeurs de France, *Technologie de la Fonderie en Moules Metalliques - Fonderie Sous Pression*, 2ª Edição ed., Paris, Paris: Édition Techniques des Industries de la Fonderie, 1977, pp. 94-95.
- [18] C. W. Ohse, “Vacuum die casting process and apparatus”. EUA Patente US 2958104 A, 1 Nov 1960.
- [19] D. C. R. Foundation, “Die casting machine and casting process”. EUA Patente US 3006043 A, 31 Out 1961.
- [20] W. M. Goldhamer, “Die casting machine and casting process”. E.U.A. Patente US3006043 A, 9 Abr 1959.
- [21] N. Muramatsu, “Chill vent”. E.U.A. Patente US 5913355 A, 22 Jun 1999.
- [22] C. K. Jin e C. G. Kang, “Fabrication process analysis and experimental verification for aluminum bipolar plates in fuel cells by vacuum die-casting,” vol. 196, n.º *Journal of Power Sources*, 15 Out 2011.
- [23] PECOL - Sistemas de Fixação, SA, “Selante Refratário,” PECOL - Sistemas de Fixação, SA, 2011. [Online]. Available: <http://www.pecol.pt/Store.aspx?activefam=0107060301&detailtype=2#>. [Acedido em 10 Jun 2014].
- [24] CustomPartNet, “Die Casting,” CustomPartNet, 2014. [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>. [Acedido em 16 Jul 2014].

- [25] J. Barbosa, *Enchimento e Alimentação*, Guimarães, 2012/2013.
- [26] Y. A. Çengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2ª ed., Reno, Nevada: McGraw-Hill, 2002.
- [27] KNF Neuberger GmbH, *Diaphragm Pumps for Air, Gases and Vapours (Data Sheet E 234)*, Freiburg: KNF Neuberger GmbH, 2013.
- [28] Edwards High Vacuum International Ltd (UK), "Vacuum Valves," Edwards Limited, 2012. [Online]. Available: <http://www.edwardsvacuum.com/Products/List.aspx?t=58>. [Acedido em 17 10 2014].
- [29] Câmara Municipal da Maia, "RISCOS ASSOCIADOS A PEQUENAS FUNDIÇÕES," Maia Inova, 30 Mar 2006. [Online]. Available: http://negocios.maiadigital.pt/hst/sector_actividade/metalomecanica/HSTFolder.2006-03-17.5465863436/HSTDdocument.2006-03-18.3723550883. [Acedido em 24 Out 2014].
- [30] Engineering Software, "Physical Properties Online Calculator," 07 2014. [Online]. Available: <http://www.engineering-4e.com/calc1.htm>. [Acedido em 03 07 2014].
- [31] Trading Economics, "Trading Economics," Trading Economics, 19 03 2013. [Online]. Available: <http://www.tradingeconomics.com/portugal/interest-rate>. [Acedido em 19 03 2014].
- [32] Banco de Portugal, "Relatório do Conselho de Administração - A Economia Portuguesa em 2012," Banco de Portugal, Lisboa, 2013.
- [33] G. C. Cascais, Realizador, *What the finns needs to know about Portugal*. [Filme]. Geração C Cascais, 2011.
- [34] R. M. de Deus, Realizador, *Ich bin ein Berliner*. [Filme]. (Video Amador), 2012.
- [35] A. Fernandes, D. Santos, D. Pereira, E. Silva, F. Matos, P. Ribeiro, R. Gomes e T. Araújo, "Coquilha para vazamento por gravidade com incorporação de sistema de vácuo.," Universidade do Minho, Guimarães, 2014.
- [36] Governo da República Portuguesa, "EVOLUÇÃO DA DESPESA DO ESTADO ENTRE 2010 E 2014," Grand Union Portugal, 2014. [Online]. Available: <http://www.portugal.gov.pt/pt/os-temas/despesa-estado/despesa-estado.aspx>. [Acedido em 1 Ago 2014].

Anexo I.

– Equipamentos utilizados no circuito de vácuo

Bomba

Após alguma pesquisa de imobilizado do Departamento foi possível escolher uma bomba KNFlab (Figura 51). Uma das particularidades deste equipamento é a capacidade de funcionar como compressor e/ou bomba de vácuo.



Figura 51: Bomba de vácuo

Apesar de existirem vários equipamentos a escolha recaiu sobre a KNF pelos seguintes fatores:

- Atravancamento;
- Utilizar corrente monofásica;
- Fácil de montar e transportar;
- Fácil manutenção;

Na Tabela 31 estão identificadas as principais características técnicas do equipamento utilizado onde comprova alguns dos critérios de seleção.

Tabela 31: Características técnicas da bomba de vácuo, adaptado [27]

Series N 035 A_.18 Pumps (N 035 AN.18 IP 20-Motor)	
Technical data:	
Delivery	30 (l/min)
Ultimate vacuum	100 (mbar abs.)
Operating pressure	4 (bar g)
Connectors for tube	ID 9 (mm)
Permissible gas and ambient temperature	+5...+40 °C
Voltage / Frequencies	230V/50Hz
Motor protection	IP 20
Power P1	220 W
Operating current	1 A
Weight	8.2 kg
Dimensions (L x H x W)	265 mm/254 mm/143 mm

No Gráfico 36 é possível verificar o tempo necessário para a bomba retirar o ar de um reservatório de 20l ($\approx 20 \text{ dm}^3$) até à pressão de 200 mbar, também é possível analisar o caudal de ar movimentado como compressor e como bomba vácuo. O reservatório usado idealizado para o circuito de vácuo tem 5 dm^3 ($\approx 5 \text{ l}$), para remover o ar do reservatório e atingir os 300 mbar são necessários cerca de 5 min, este valor é bastante bom tendo em conta o tempo de entre ciclos.

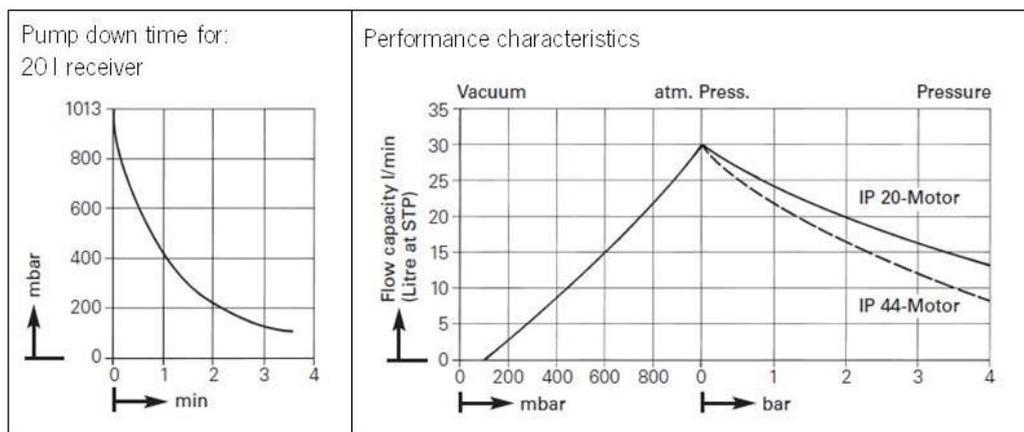


Gráfico 36: Performance da bomba, adaptado [27]

Como vantagem adicional, a bomba é um equipamento acessível e não precisa de ligações especiais, permitindo a sua utilização em vários tipos de tarefas no tempo em que não se estão a fazer vazamentos.

Válvula

A válvula reguladora utilizada faz parte de um conjunto de equipamentos de vácuo da marca *Edwards* que pertence ao Departamento de Mecânica. As características do equipamento encontram-se na Tabela 32 [28].

Tabela 32: Características técnicas da válvula reguladora- adaptado [28]

Construction materials	
Body	Aluminium alloy to BS1490
Hand wheel and bonnet	Glass reinforced plastics
Diaphragms	Nitrile or Fluoroelastomer
Leak rate (1 bar differential)	
Valve (overall and across seat)	$10^{-2} \text{ mbar ls}^{-1}$
Coupling	$10^{-7} \text{ mbar ls}^{-1}$
Molecular conductance	
SP25K	9.0 ls^{-1}
Pressure rating using Co-Seal	9 bar
Ambient operating range	0 to 40 °C
Ambient storage range	-10 to 40 °C
Panel thickness	3 mm maximum
Weight	
SP25K	760 g
Baking temperature	60 °C

As vantagens principais na utilização deste componente são a sensibilidade de ajuste para a pressão pretendida, de fácil montagem e robustez, além de estar disponível no Laboratório de Tratamentos Térmicos.

Na Figura 52 estão as medidas e atravancamento da válvula utilizada.

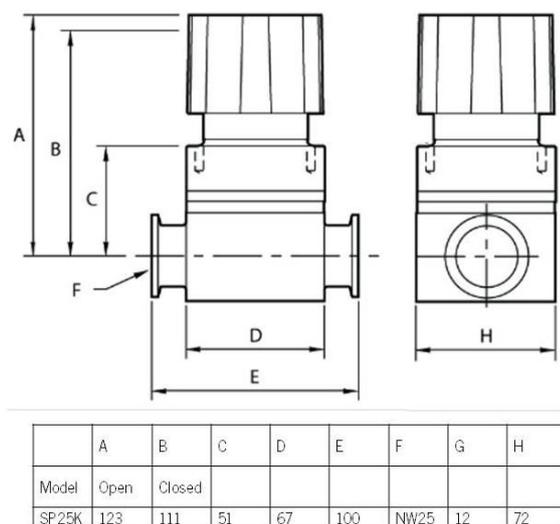


Figura 52: Esquema da válvula reguladora

Vacuómetro

O vacuómetro utilizado é um tubo de Bourbon e respeita a norma EN 837-1 e pertence à classe 1.6, que corresponde a uma exatidão de $\pm 1,6\%$. A medição é à escala relativa, tem um mostrador combinado com intervalo de -1bar a 1,5bar e a resolução é de 0.1 bar.



Figura 53: Vacuómetro

O equipamento é da marca Wika tipo 213.53.63, feito em aço com mostrador de 63mm e com banho interno de glicerina. São equipamentos conhecidos pela sua robustez, resistente ao choque e às vibrações.

Ligações

As uniões entre componentes respeitam a norma ISO KF (Figura 54), exceto a ligação à coquilha e à bomba. As uniões KF permitem uma boa vedação do circuito impedindo entradas de ar, no entanto estes componentes são caros e obrigam a uma geometria específica dos componentes. Apenas se recorreu a estas peças pelo facto de estarem disponíveis no Departamento.



Figura 54: Uniões ISO KF

Na coquilha e bomba foram usadas ligações simples de ar comprimido. Estas uniões são bastante acessíveis e fáceis de encontrar em qualquer loja de ferragens.



Tubo

O tubo utilizado é feito em *nylon*, respeita a norma DIN 73 378 e tem diâmetro interno 8mm e externo de 10mm. Este tipo de tubo é utilizado em sistemas de ar comprimido, é indicado para uma pressão de trabalho até 13bar e podem aguentar até 20bar em condições ideais.

Anexo II.

– Recomendações de Higiene e Segurança no Trabalho

Riscos

Na Tabela 33 estão identificados os principais riscos que os trabalhadores da indústria da fundição encaram diariamente.

Tabela 33: Riscos da indústria da fundição, reproduzido de [29]

Principais Riscos	Condições Perigosas
<ul style="list-style-type: none">– Exposição a contaminantes químicos;– Exposição ao ruído;– Exposição a vibrações;– Exposição a radiações não ionizantes (infravermelha) associados à radiação do metal fundido e dos métodos de aquecimento do metal;– Riscos térmicos (temperaturas elevadas)– Risco de corte e esmagamento;– Contacto com superfícies a temperatura extrema;– Explosão;– Projeção de partículas;– Riscos de choque ou impacto;– Quedas (objetos ou pessoas) e escorregamento;– Riscos elétricos;– Desrespeito pelos princípios ergonómicos.	<ul style="list-style-type: none">– Transporte em empilhador ou ponte rolante de materiais (instabilidade, condução perigosa, deficiente conservação do pavimento);– Execução de tarefas no alto-forno ou na sua proximidade:– Abastecimento e vazamento do forno;– Enchimento dos moldes;– Manuseio de peças a temperaturas elevadas;– Presença no ar ambiente de produtos ou substâncias químicas nocivas, resultantes do processo, nomeadamente partículas metálicas, poeiras respiráveis, sílica, fumos metálicos, gases nocivos (CO, CO₂), aerossóis de óleo mineral;– Utilização matéria- prima húmida (ex.: sucata);– Utilização de ferramentas molhadas para trabalhar com metal fundido;– Contacto com metal líquido;– Manuseio de peças/substâncias a temperaturas elevadas;– Existência de derrames no pavimento;– Utilização de máquinas manuais (ex.: rebarbadoras);– Contacto com rebarbas ou arestas vivas;– Ruído provocado pelas operações de rebarbagem, esmerilagem, limpeza por tambor ou desmoldação mecânica;– Iluminação insuficiente dos postos de trabalho– Contacto com partes ativas;– Posturas de trabalho incorretas e forçadas;– Movimentação manual de cargas.

Sugestões

As principais sugestões para respeitar as recomendações para a Saúde, Segurança e Higiene no Trabalho são as seguintes (reproduzido de [29]):

- Otimizar a ventilação geral do local de trabalho (adequar o caudal de ar fresco às necessidades do local); em determinados casos pode-se recorrer também à instalação de ventilação localizada (zonas de grande produção de calor)
- Disponibilizar pontos de água potável (bebedouros) nos locais onde a temperatura ambiente seja elevada
- Instalar painéis térmicos entre os postos de trabalho e as fontes emissoras de calor (radiação infravermelha) (fornos, metal em fusão, etc.)

- Instalar sistemas fechados para o transporte do metal líquido (sistemas de calhas fechadas e isoladas)
- Estabelecer períodos de descanso em locais mais frescos para os trabalhadores expostos a ambientes quentes
- Isolar e confinar as principais fontes de contaminantes químicos aéreos
- Dotar os locais de trabalho onde haja a emissão de contaminantes químicos para o ambiente de trabalho (ex.: fusão, moldação, vazamento, macharia, operações de acabamento, etc.) de sistemas de aspiração e ventilação localizada e/ou geral (quando a fonte emissora assume proporções tais que a aspiração localizada não seja possível)
- Dotar os espaços de trabalho onde exista a emissão de gases tóxicos e asfixiantes (ex.: produção de monóxido de carbono e de dióxido de carbono durante a fusão) de monitores (detetores) com avisos sonoros para o caso de se atingirem concentrações perigosas
- Promover a rotatividade dos trabalhadores (principalmente dos que executam tarefas em locais com ambientes quentes e expostos a níveis de ruído elevados)
- Dotar os circuitos elétricos de dispositivos de segurança (disjuntores de alta sensibilidade)
- Prover uma correta manutenção dos equipamentos elétricos
- Ligar todos os equipamentos e aparelhos elétricos à terra
- Respeitar as regras de segurança estabelecidas para a utilização segura de máquinas específicas
- Separar, limpar e secar toda a sucata antes de esta ser utilizada como matéria-prima (antes de entrar em contacto com temperaturas elevadas)
- Assegurar que todas as ferramentas utilizadas em metal líquido ou em processos de fusão se encontram limpas e secas
- Isolar os equipamentos ou locais onde haja uma emissão de ruído elevada (através da instalação de painéis insonorizantes, encapsulamento dos equipamentos mais ruidosos ou disponibilização de cabinas insonorizadas para os trabalhadores)
- Disponibilizar escadas e plataformas fixas com corrimão e guarda-corpos para aceder a zonas elevadas
- Promover a ordem e limpeza dos locais de trabalho; as vias de circulação e os locais de trabalho devem manter-se livres de obstáculos e limpos (em casos de derrames, estes devem ser contidos e o local deve ser limpo de imediato)
- Estabelecer percursos bem definidos e identificados para a movimentação mecânica de materiais
- Assegurar que todo o material a transportar se encontra devidamente acondicionado e estável
- Manter o pavimento das zonas de circulação em bom estado de conservação e sinalizar desníveis e zonas do pavimento que se encontrem danificadas

- Estabelecer inspeções regulares às máquinas e equipamentos, nomeadamente pontes-rolantes, equipamentos a gás, etc.
- Implementar programas de proteção ocular e auditiva
- Prover a iluminação dos postos de trabalho adequada às exigências visuais das tarefas
- Sinalizar os locais de trabalho
- Restringir o acesso a locais de risco elevado apenas aos trabalhadores com formação específica
- Formar os trabalhadores para um correto manuseamento das cargas e adoção de posturas de trabalho adequadas
- Formar e informar os trabalhadores acerca dos riscos a que estão expostos e sobre o métodos de trabalho seguros que devem adoptar
- Disponibilizar EPI´s adequados às tarefas desempenhadas, nomeadamente:
 - *Roupa de trabalho adequada (para trabalhos junto a fontes emissoras de calor, como por ex. fornos, usar fato completo que proporcione isolamento térmico e seja em material ignífugo)*
 - *Proteção auricular devidamente dimensionada (auriculares ou abafadores)*
 - *Proteção da face e dos olhos (para os trabalhadores dos fornos, vazamento, etc., ou seja, que possam estar expostos a situações de deslumbramento, as lentes dos óculos ou o material das viseiras devem ser de material adequado)*
 - *Luvas de proteção*
 - *Calçado de proteção (as botas devem possuir um sistema de desaperto rápido)*
 - *Capacetes de proteção (em locais onde haja riscos de queda de objectos)*
 - *Gorros ou capuz com proteção térmica e em material ignífugo (para os trabalhadores dos fornos e que desempenhem tarefas junto do metal em fusão)*
 - *Proteção respiratória (adequada às substâncias químicas presentes no ambiente de trabalho)*

Anexo III.

– Preparação da pintura refratária

FOLHA TÉCNICA**FOUNDRY TER****DESCRIÇÃO**

Pintura isolante e refratária em pó, utilizada para proteção de ferramentas de metal, cadinhos, canais de transporte de calor em contato com metal fundido.

MODO DE APLICAÇÃO**DILUIÇÃO:**

Pintura fornecida em forma de pó para ser diluída em água antes da sua utilização.

Percentagem de utilização: 0,8 kg de FOUNDRY TER com 1 L de água, adicionando o pó à água enquanto se mistura. Em caso de necessidades específicas, a percentagem de diluição pode ser alterada.

Mexer até o produto ficar homogêneo e deixar repousar por um período de 12 horas antes da sua utilização, ou durante toda a noite, de forma a permitir que a pintura atinja a viscosidade correta. Agitar frequentemente durante o processo de utilização ou aplicação.

APLICAÇÃO:

O produto deve ser aplicado em superfícies metálicas limpas, à temperatura de 80-100°C.

O produto pode ser aplicado a pincel, ou por mergulho.

Reaplicar frequentemente durante a utilização.

Em caso de superfícies grandes, aplicar 3-4 camadas de pintura antes da utilização, podendo ser alterada em situações específicas.

Sugere-se aplicar uma camada fina, para evitar que a pintura quebre durante a secagem da superfície.

Uma vez terminada a aplicação, é altamente recomendável verificar a secagem apropriada da camada, antes do contato com o metal fundido.

VANTAGENS

- Elevada proteção da superfície
- Excelentes performances de suspensão
- Boa aderência às superfícies
- Proporciona superfícies com espessura homogênea

EMBALAGEM

Armazenar na embalagem original. Fechar a embalagem após cada utilização.

EMBALAGEM

Sacos de papel com 20 kg.

ADVERTÊNCIAS

Para obter informação complementar, ver p.f. a ficha de segurança do produto.

Anexo IV.

– Introdução de dados de pressão no *NovaFlow & Solid*

Variáveis

O uso de baixa pressão em fundição tem resultados positivos em determinadas tecnologias, como a fundição injetada ou por cera perdida. O *software NovaFlow & Solid* apenas permite testar vazamentos em ambiente atmosférico ou em vácuo absoluto. Para colmatar essa falha é possível parametrizar ambientes intermédios, aproveitando essa possibilidade foram adicionadas 3 novas pressões; 80kPa, 60kPa e 40kPa ficando designados no *software* como -0.2Bar, -0.4Bar e -0.6Bar respectivamente (valores correspondentes na escala relativa).

As variáveis utilizadas no *software* para a análise numérica da atmosfera da moldação são;

Densidade (ρ);

Condutividade térmica (k);

Calor específico (a pressão constante - c_p);

Viscosidade cinemática (ν).

Os dados usados para introdução dos dados assumiram que o ar tem o comportamento de um fluido Newtoniano e de um gás perfeito, seguindo o mesmo princípio dos valores que se encontram no *NovaFlow & Solid* para a pressão atmosférica.

Densidade

A densidade foi calculada pela equação dos gases ideais (1) em intervalos de 50°C entre 0°C e 1000°C e em intervalos de 500°C entre 1000°C e 2500°C. O metal vazado está no máximo a 1200°C.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1)$$

Na coquilha, a variação volumétrica por influência da temperatura é residual, permitindo reformular a equação (1) para uma nova equação (2) colocando a densidade em evidência.

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (2)$$

A

Tabela 34 representa a os valores obtidos pela equação (2) à pressão atmosférica, 40kPa, 60kPa e 80kPa e posteriormente introduzidos no *Novaflow & Solid*.

Tabela 34: Densidade do ar

	Atm	40 kPa	60 kPa	80 kPa		Atm	40 kPa	60 kPa	80 kPa
0	1,275	0,510	0,765	1,020	600	0,399	0,160	0,239	0,319
50	1,078	0,431	0,647	0,862	650	0,377	0,151	0,226	0,302
100	0,934	0,373	0,560	0,747	700	0,358	0,143	0,215	0,286
150	0,823	0,329	0,494	0,659	750	0,340	0,136	0,204	0,272
200	0,736	0,295	0,442	0,589	800	0,325	0,130	0,195	0,260
250	0,666	0,266	0,400	0,533	850	0,310	0,124	0,186	0,248
300	0,608	0,243	0,365	0,486	900	0,297	0,119	0,178	0,238
350	0,559	0,224	0,335	0,447	950	0,285	0,114	0,171	0,228
400	0,518	0,207	0,311	0,414	1000	0,274	0,109	0,164	0,219
450	0,482	0,193	0,289	0,385	1500	0,196	0,079	0,118	0,157
500	0,451	0,180	0,270	0,360	2000	0,153	0,061	0,092	0,123
550	0,423	0,169	0,254	0,339	2500	0,126	0,050	0,075	0,100

O Gráfico 37 permite verificar que a redução da pressão reduz a densidade do ar, havendo uma aproximação com o aumento da temperatura. De realçar que na zona de trabalho (0°C a 1200°C) a diferença ainda é significativa.

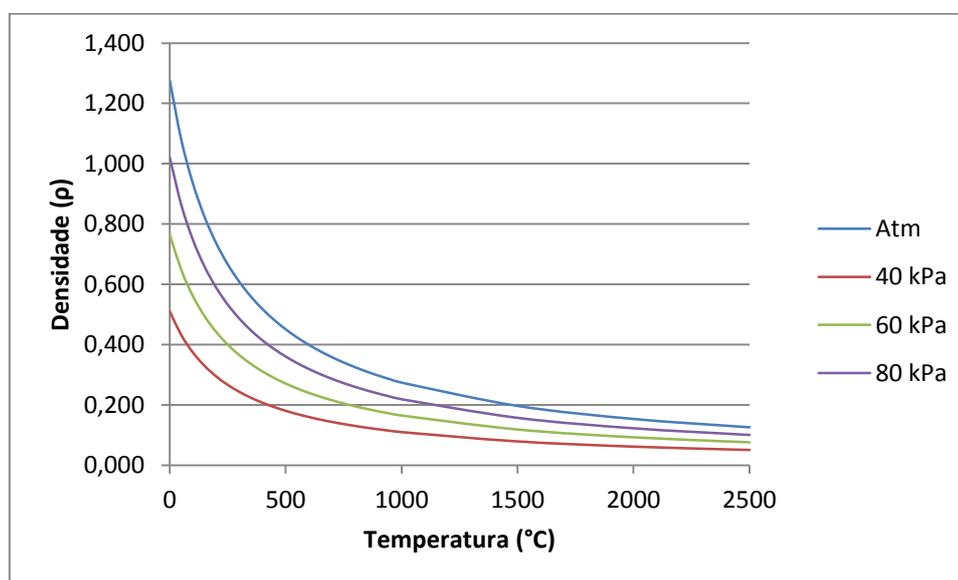


Gráfico 37: Densidade do ar

Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma característica inerente a cada material, que se traduz na capacidade que cada material tem em proporcionar energia calorífica. No caso do ar a variação apenas se verifica com a variação da temperatura. O Gráfico 38 mostra que apenas a temperatura interfere na variação de k . Os valores utilizados foram retirados de tabelas e de calculadoras *online* [26] [30].

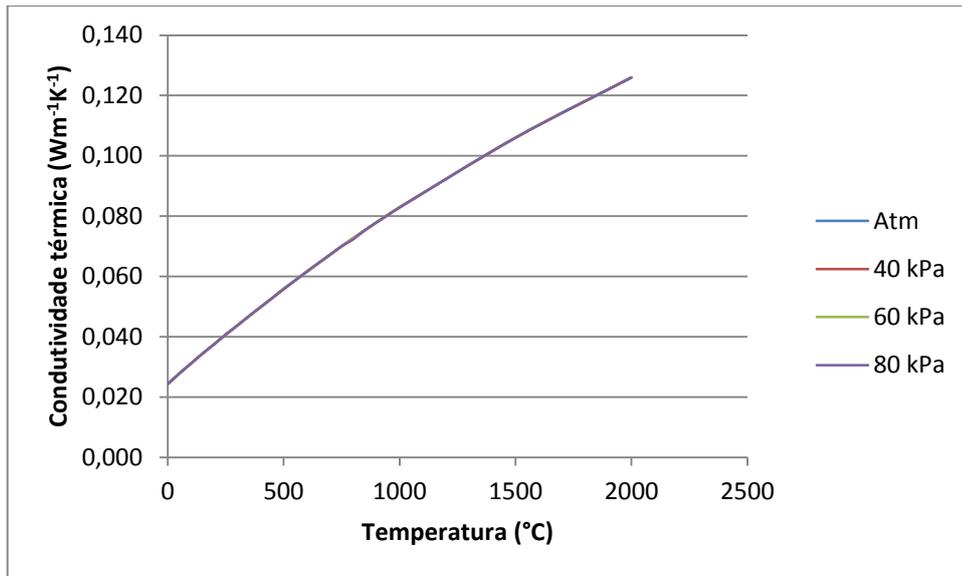


Gráfico 38: Condutividade térmica

O ar é considerado um isolante natural e na ausência de convecção e a radiação não é perceptível a condução térmica do ar, onde as variações são residuais. É bastante evidente este fenómeno no ar atmosférico, durante o dia o ar é aquecido pela radiação do sol e pela convecção do solo, à noite apenas o solo aquece o ambiente ao continuar a convecção de calor que absorveu durante o dia e do calor proveniente do seu núcleo. A redução de pressão apenas torna o ar mais rarefeito.

Calor específico

O C_p foi obtido da mesma forma da condutividade térmica. Esta variável reflete a capacidade que um elemento tem em receber uma determinada quantidade de calor. No Gráfico 39 é possível visualizar que o C_p para as pressões pretendidas aumenta com a temperatura.

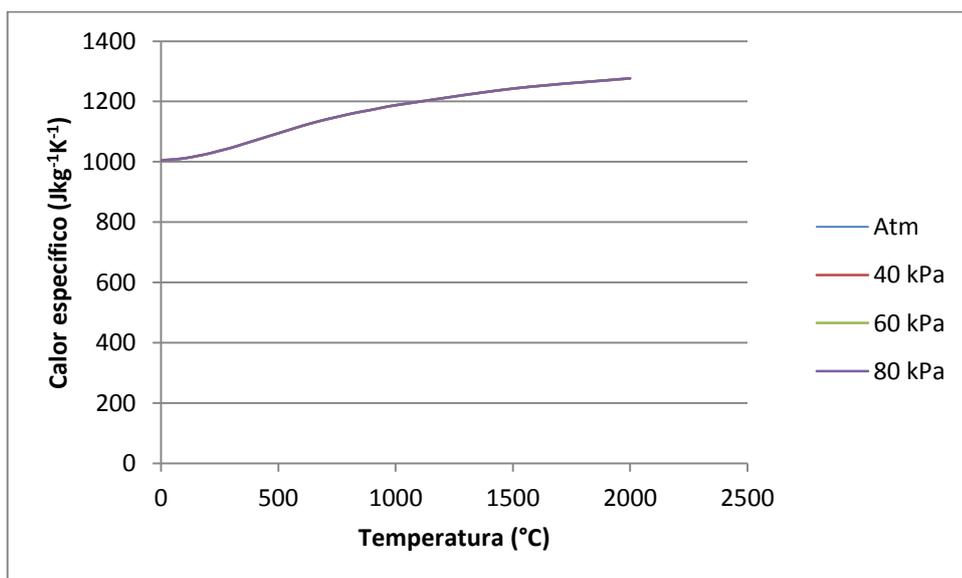


Gráfico 39: Calor específico

O ar requer bastante calor para aumentar a sua temperatura específica em parte devido à sua característica isolante e por outro lado influenciado pela sua baixa densidade. Também por isso as pressões em análise não interferem significativamente na variação do Cp.

Viscosidade cinemática

A viscosidade caracteriza a resistência que um dado fluido impõe ao seu próprio deslocamento.

A viscosidade cinemática foi obtida numa primeira fase por tabelas que geralmente fornecem a viscosidade dinâmica (μ). Sabendo que o ar tem um comportamento de fluido newtoniano foi utilizada uma das reduções da equação de *Reynolds* (3), que se traduz na equação (4).

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (3)$$

Colocando μ em evidência:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

A

Tabela 34, que tem os valores calculados da densidade para as diferentes temperaturas, juntamente com os critérios acima referidos serviram de base para a elaboração da Tabela 35.

Tabela 35: Viscosidade cinemática

	Pressão			
	Atm	40 kPa	60 kPa	80 kPa
0	1,349	3,372	2,261	1,696
50	1,827	4,569	3,046	2,284
100	2,346	5,865	3,928	2,946
150	2,927	7,318	4,879	3,659
200	3,545	8,862	5,908	4,431
250	4,220	10,550	7,033	5,275
300	4,919	12,298	8,199	6,149
350	5,671	14,176	9,451	7,088
400	6,454	16,135	10,757	8,067
450	7,286	18,216	12,144	9,108
500	8,145	20,363	13,575	10,181
550	9,026	22,566	15,044	11,283
600	9,976	24,939	16,626	12,470
650	10,944	27,361	18,241	13,681
700	11,928	29,821	19,880	14,910
750	12,952	32,381	21,587	16,190
800	14,017	35,041	23,361	17,521
850	15,121	37,802	25,202	18,901
900	16,232	40,580	27,053	20,290
950	17,380	43,450	28,967	21,725
1000	18,566	46,414	30,943	23,207
1500	32,067	80,167	53,445	40,084
2000	48,352	120,880	80,587	60,440

O Gráfico 40 mostra que com o aumento da temperatura e com a redução da pressão a viscosidade cinemática aumenta significativamente.

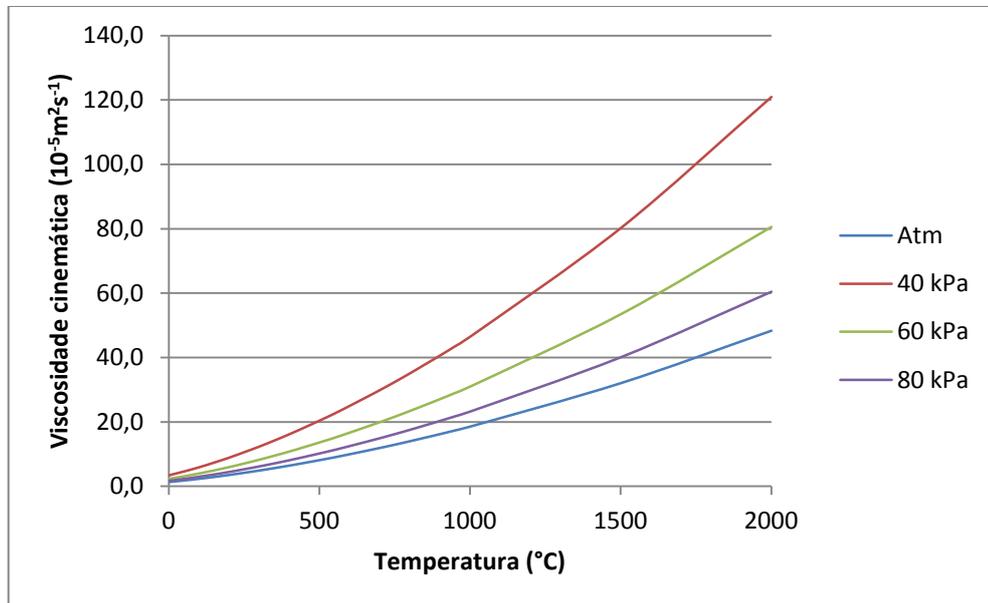


Gráfico 40: Viscosidade cinemática

Anexo V.

– Listagem dos ensaios experimentais realizados

Tabela 36: Ensaios experimentais

Ensaios de Vazamento																													
Ensaio nº	Data	Hora	T. da coquilha C°	T. do Forno da coquilha C°	T. da do Forno da bacia C° (min)	T da bacía durante o vazamento C°	T. do Bronze C°	Válvula de vácuo	M (g)			V (ml)			ρ			Diâmetro (mm)			Comp. (mm)			metal no canal de escoamento (mm)	Obs				
									2mm	3mm	5mm	2mm	3mm	5mm	2mm	3mm	5mm	2mm	3mm	5mm	2mm	3mm	5mm			2mm	3mm	5mm	
1	03-02-2014	11:33		100	1150 (5)		1150	Posição 1		3,16				-								78		N	Sem falhas, metal líquido fluido	Sem lítica refratária			
2	03-02-2014	11:56		250	1150 (5)		1150	Posição 1														68		N	Sem falhas, metal líquido pouco fluido				
3	10-02-2014	10:26	140	200	1150 (5)	400	1150	S/vácuo		5,88			0,8				7350					108		N	Metal líquido fluido, preenchimento completo	Com lítica refratária (SEMICQZIR 3SPX)			
4	10-02-2014	12:06	104	200	1000(2)	227	1000	Posição 1					-											N	S/preenchimento excesso de refratário				
5	10-02-2014	13:30	105	200	1050 (5)	340	1050	Posição 1		4,28			0,55				7691					108		2	Com várias estricções ao longo da vareta				
6	10-02-2014	14:42	150	200	1050 (6)	440	1050	Posição 1		3,39			0,4				8350					108		3,8	Vareta espalmada no alinhamento do plano de apartação				
7	10-02-2014	15:40	130	200	1050 (5)	320	1050	Posição 1		4,73			0,6				7883					108		12	Melhor preenchimento, mas mantem-se espalmada				
8	10-02-2014	14:28	145	200	1050 (5)	360	1050	S/vácuo		4,59			0,6				7650					100,2		N	S/preenchimento total, falhas provocadas pelo refratário				
9	10-02-2014	17:55	145	200	1050 (5)	310	1050	Máx		4,91			0,6				8183					108		12	Com uma estricção				
10	14-05-2014	11:10	AD	250	250	110	1050	S/vácuo		2,52	5,29		0,3	0,6			8400	8817				0	55,5	32,2	(0;0;0)		Varetas incompletas, com separação de escoamento	Com lítica refratária (Foundry TER)	
11	14-05-2014	12:15	AD	250	250	110	1050	0,5 0 (Vaz)		2,5	14,44		0,3	1,7			8333	8494				0	39,6	99,6	(0;0;0,79)		Varetas incompletas, com separação de escoamento. Plano de apartação visível, sinal de perda de vácuo		
12	14-05-2014	14:00	AD	250	250	...	1100	0,5 0 (Vaz)	0,49	4,02	16,69	0,06	0,47	1,95			8167	8559				1,95	74,51	108	(0;0;2)	Vareta de 5mm completa. Plano de apartação visível (perda de vácuo). Obtenção de vareta parcial de 2mm.			
13	14-05-2014	16:00	AD	250	1100(5)	410	1100	0,6 0 (Vaz)		3,83	16,69		0,45	1,96			8511	8515				0	68,4	108	(0;0;0)	Vareta de 5mm completa. Plano de apartação visível (perda de vácuo).			
14	21-05-2014	11:25	AD	250	1050 (5)	393	1050	0,7 0,6 (Vaz)	0,4	0,91	11,2	N/D	0,11	1,28	N/D		8273	8750				18,1	30,8	71,9		N	Desprendimento do caudal e obstrução do canal de vácuo com bronze	Com lítica refratária (SEMICQZIR 3SPX)	
15	21-05-2014	14:35	AD	250	1050 (5)	515	1050	0,2 Bar 0,05 (Vaz)	0,39	1,38	13,27	0,05	0,16	1,53	7800	8625	8673					17,9	29,45	92,8		N	Apenas com desprendimento na vareta de 5mm. Varetas de secção uniforme.		
16	21-05-2014	16:25	AD	350	1050 (10)	630	1050	0,65 0,65 (Vaz)	0,85	2,58	10,07	0,1	0,31	1,2	8500	8323	8392					21,2	108	83,7	(0;12,85;4,9)	Muitas falhas de preenchimento. Bronze em todo o comprimento junto ao plano de apartação.			
17	23-06-2014	11:20	AD	250	1100(5)	532	1100	0,65 0(Vaz)	1,26	4,89	12,69	0,15	0,6	1,5	8400	8150	8460					63,7	109,5	86,95	(0;13;0,5)	Muitas falhas de preenchimento. Bronze em todo o comprimento junto ao plano de apartação.	Com lítica refratária (SEMICQZIR 3SPX)		

Anexo VI.

– Imagens obtidas através do microscópio ótico

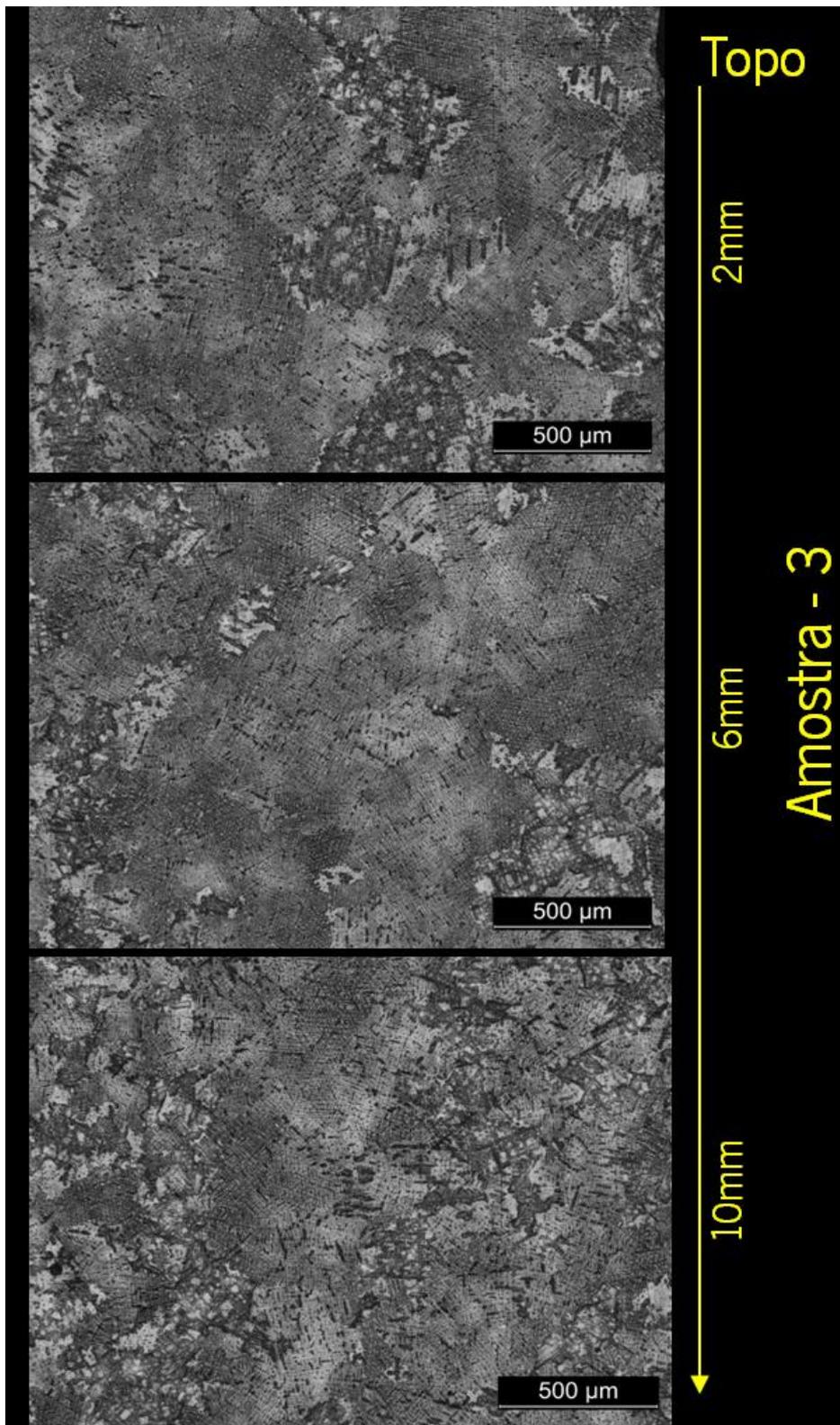


Figura 55: Amostra - 3 (topo)

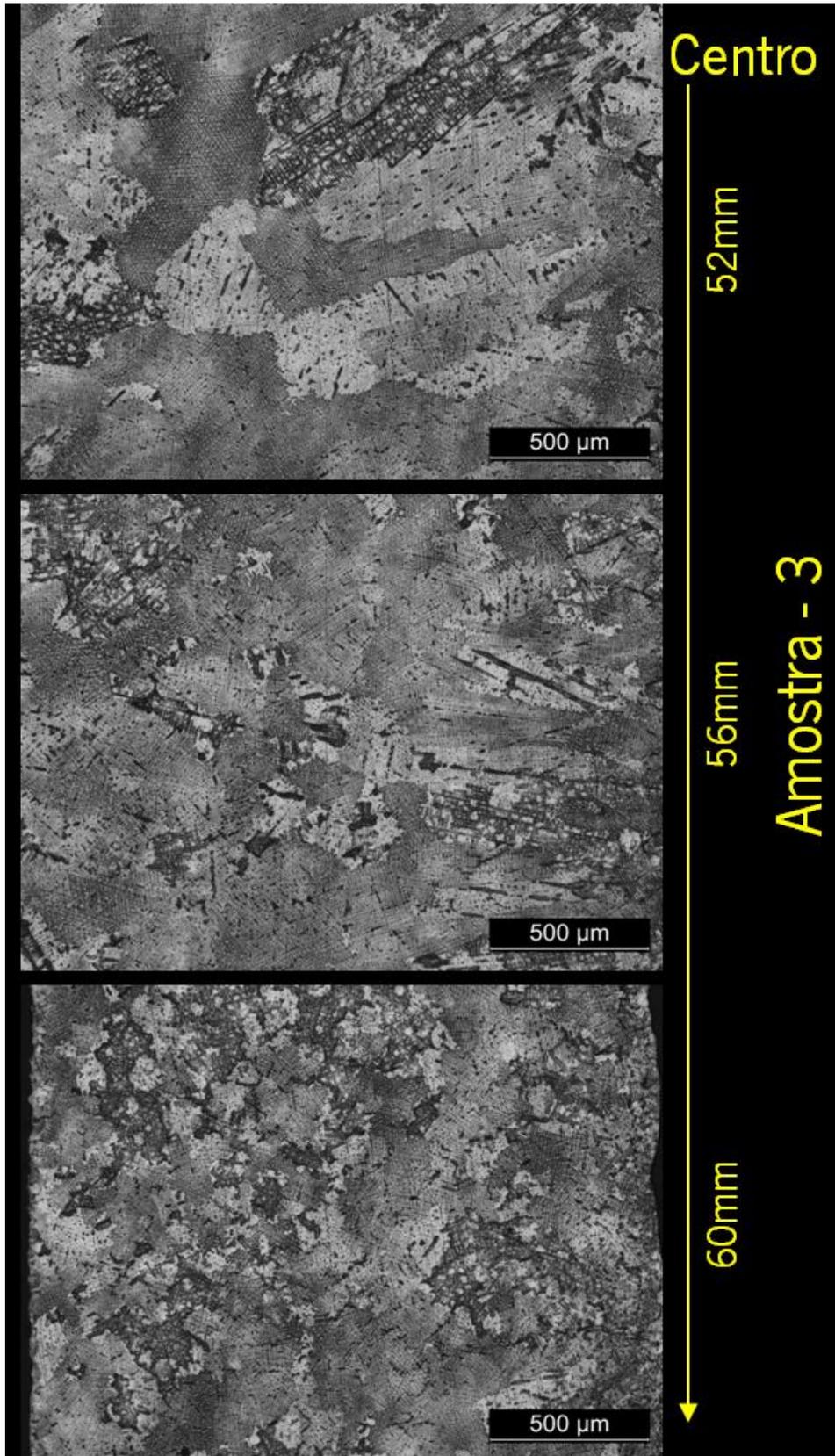


Figura 56: Amostra- 3 (Centro)

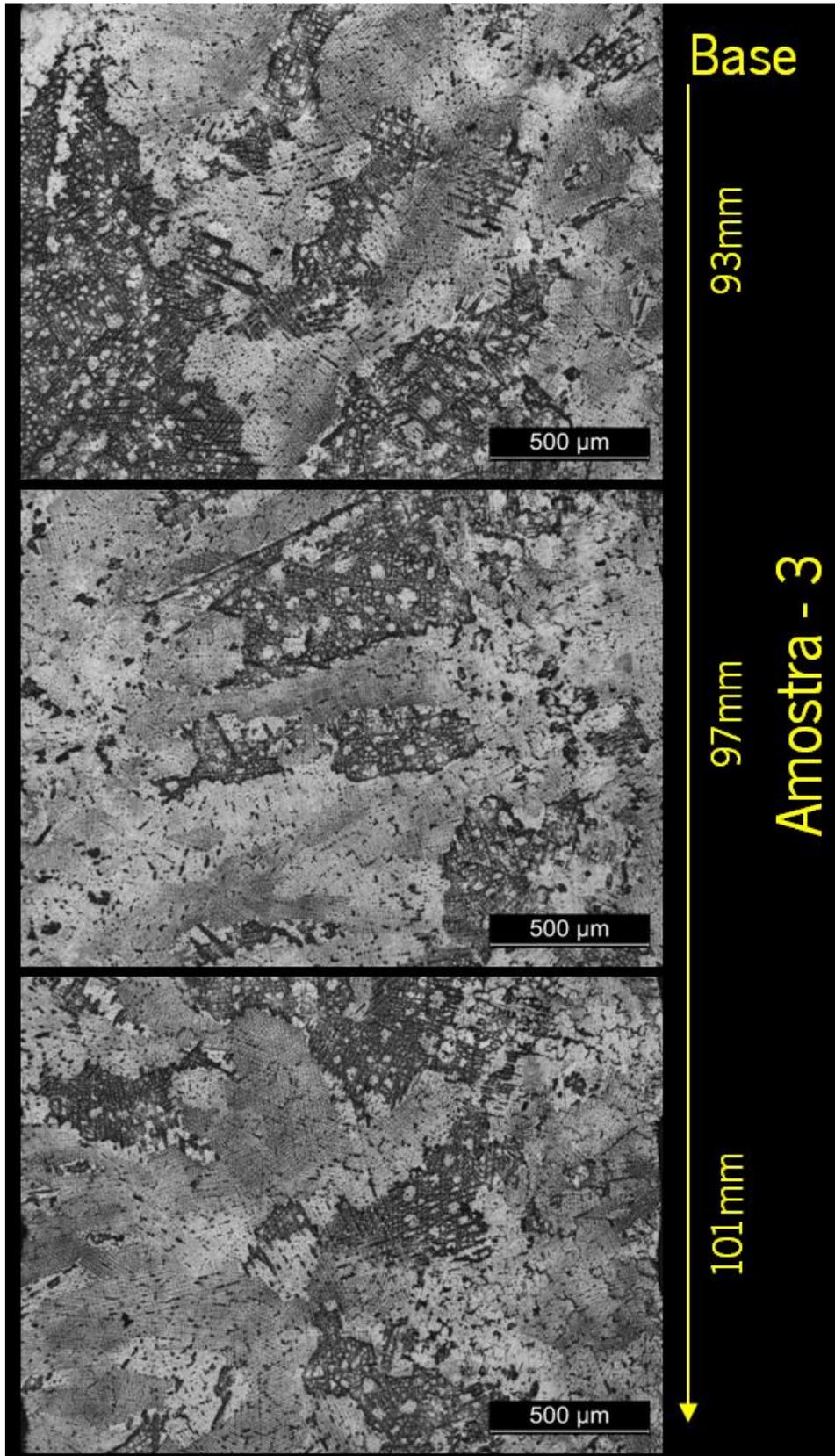


Figura 57: Amostra - 3 (Base)

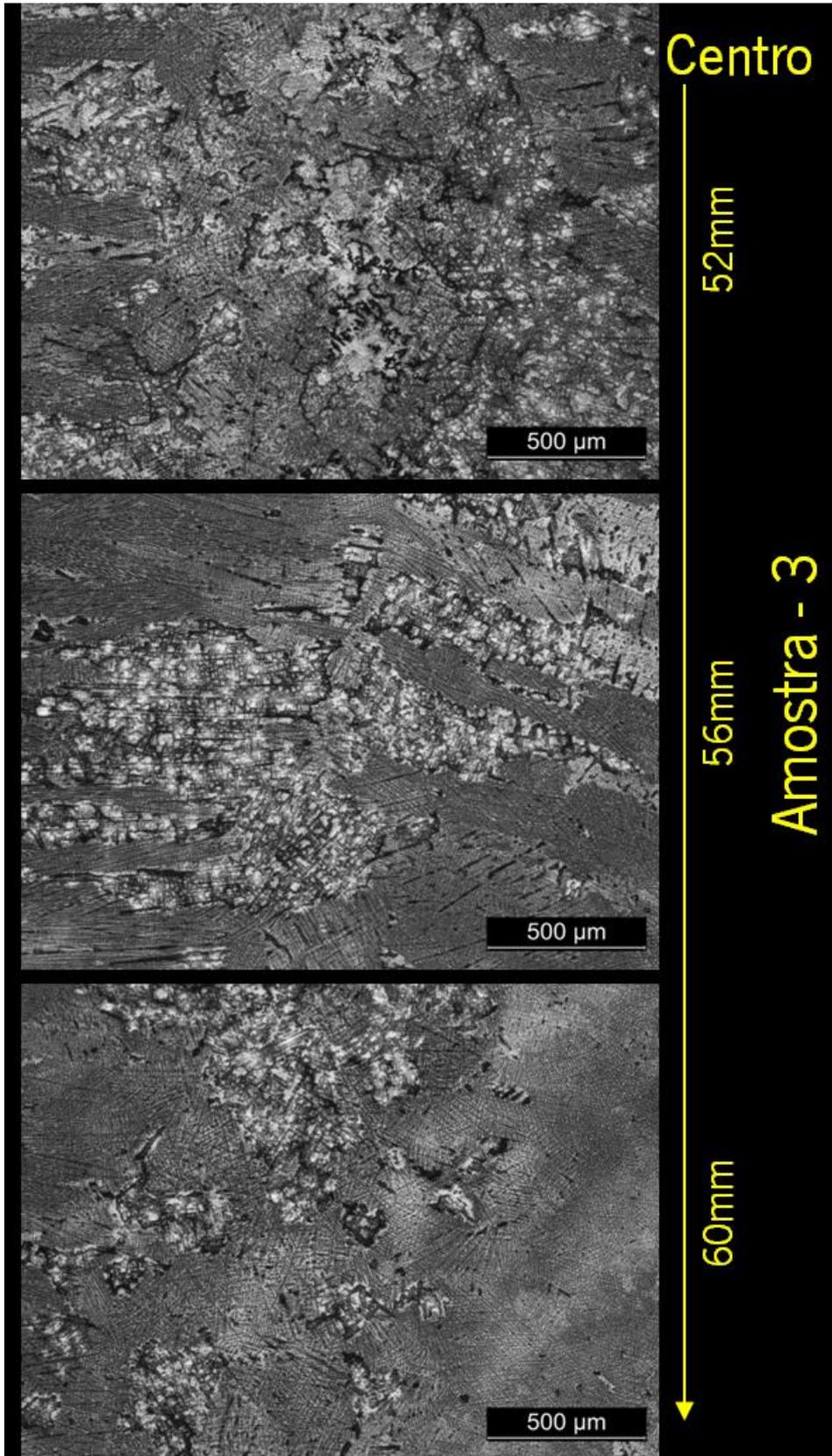


Figura 58: Amostra - 6 (Centro)

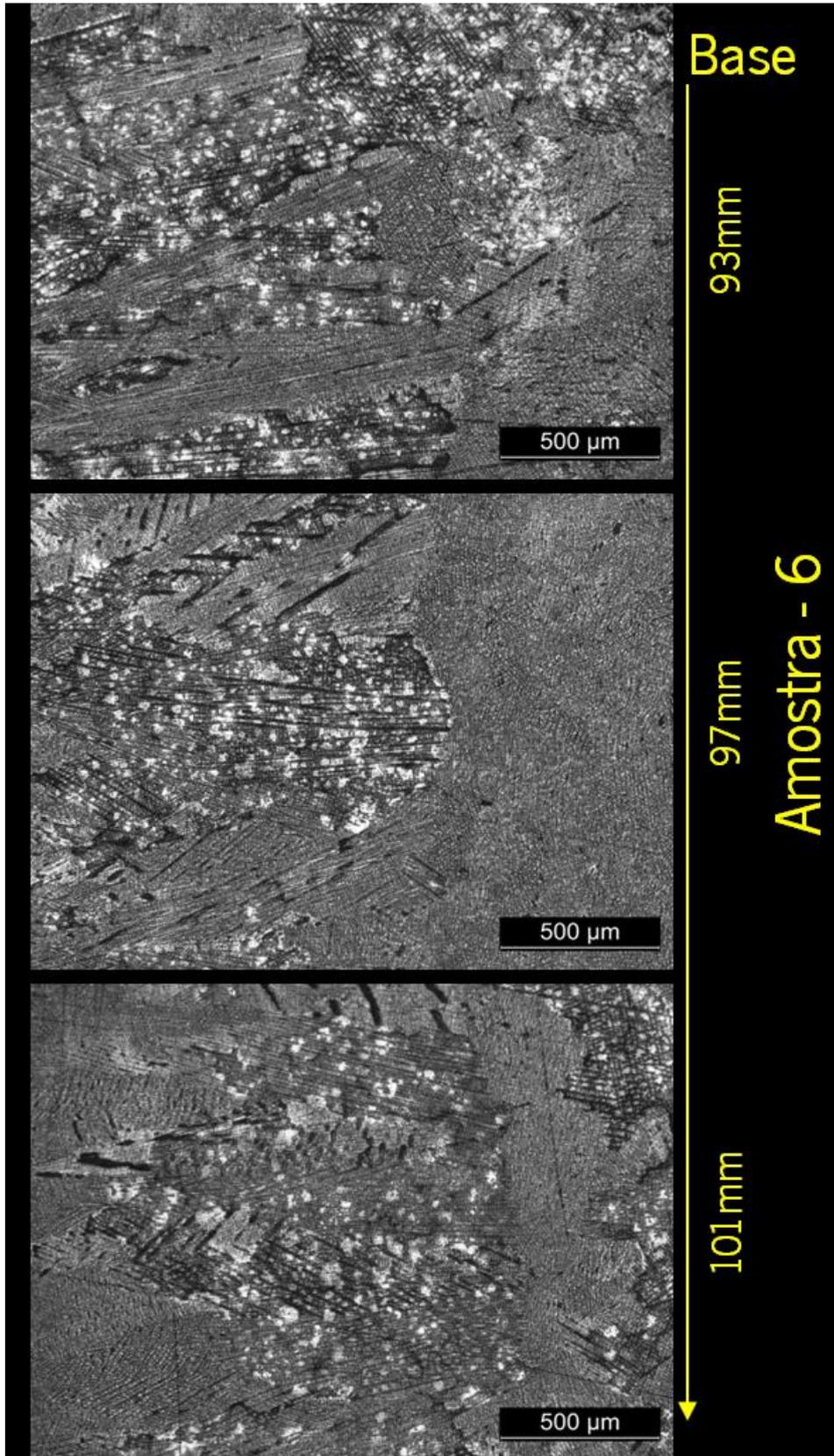


Figura 59: Amostra - 6 (Base)

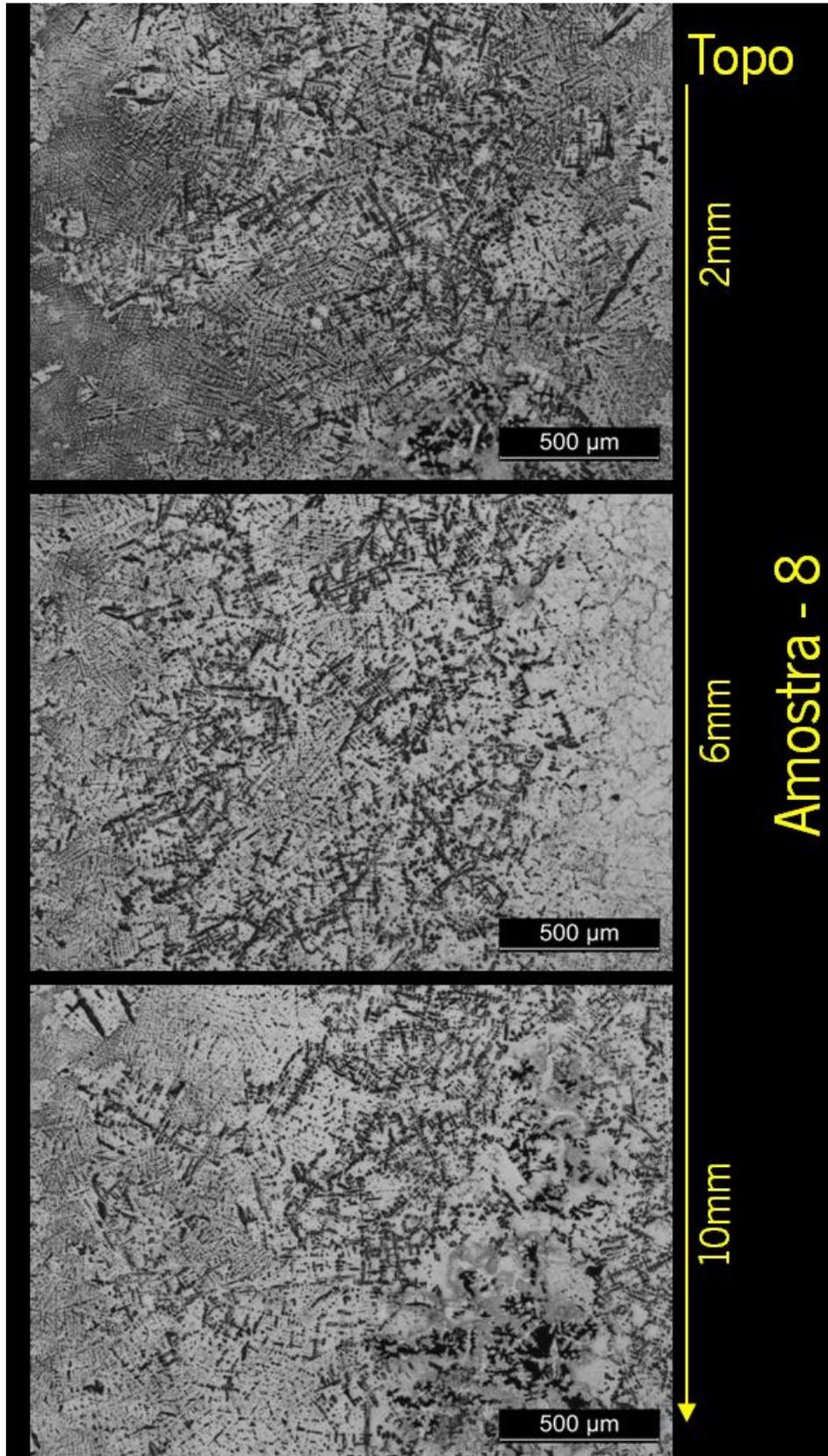


Figura 60: Amostra - 8 (Topo)

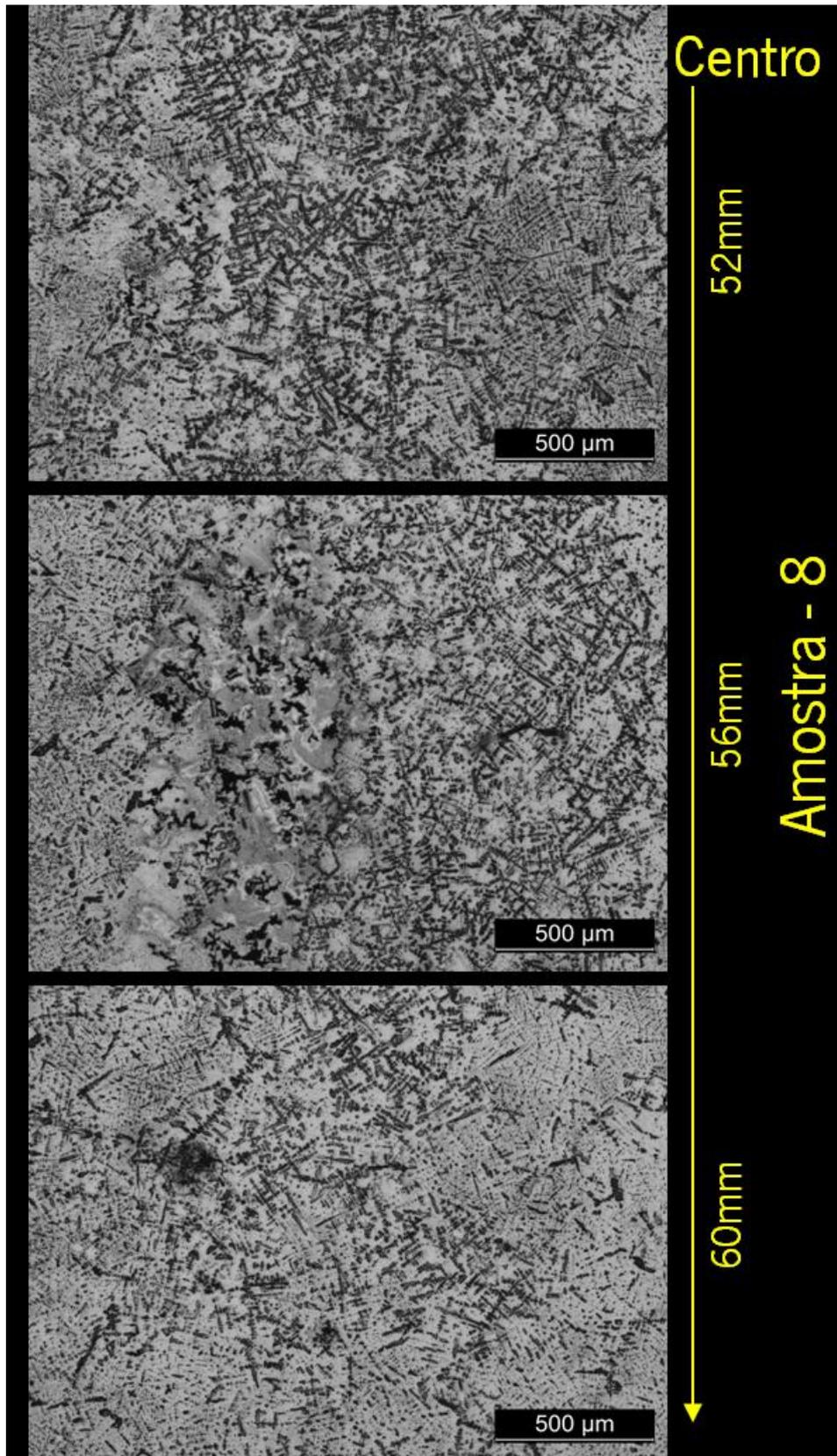


Figura 61: Amostra - 8 (Centro)

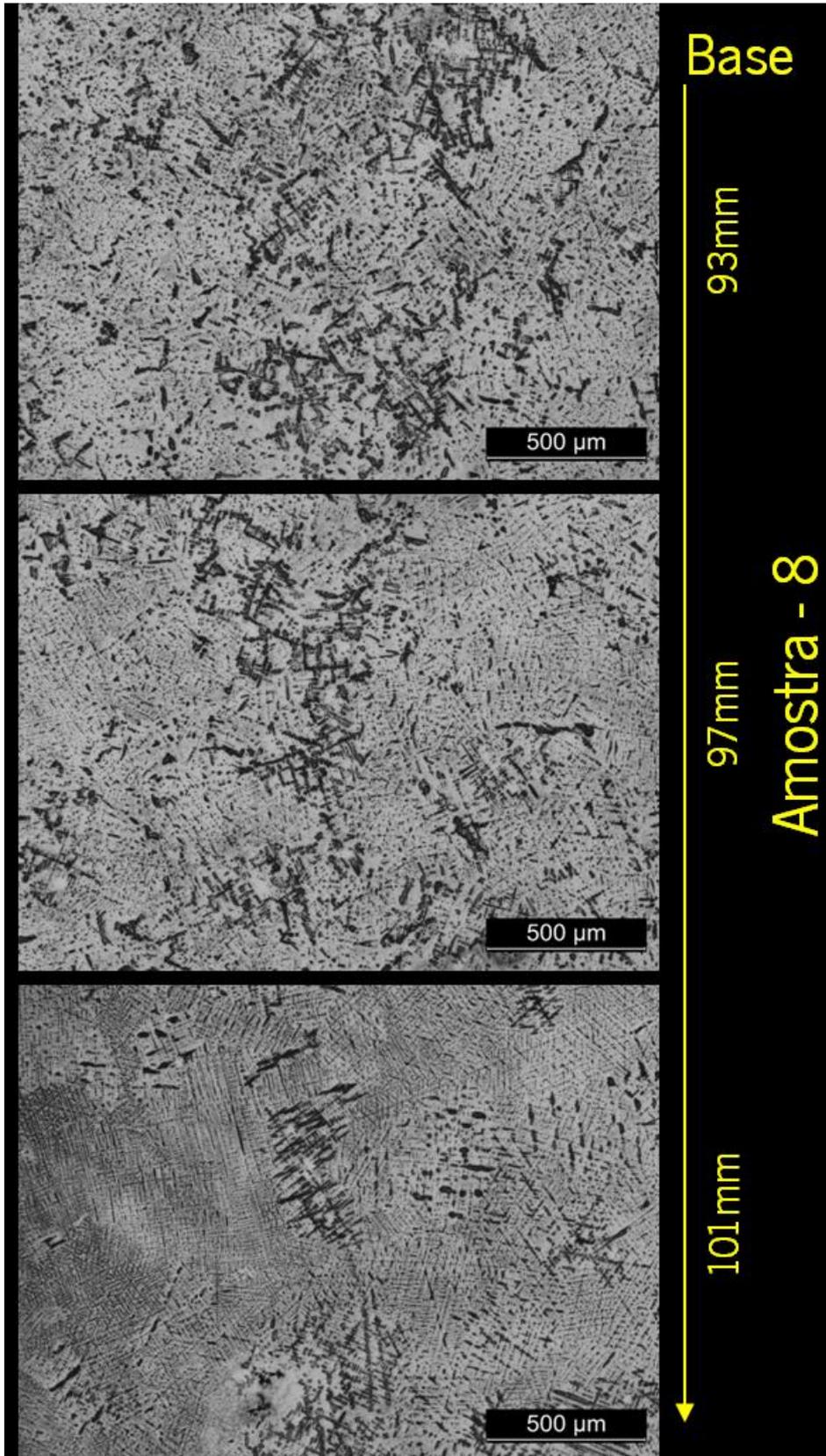


Figura 62: Amostra - 8 (Base)

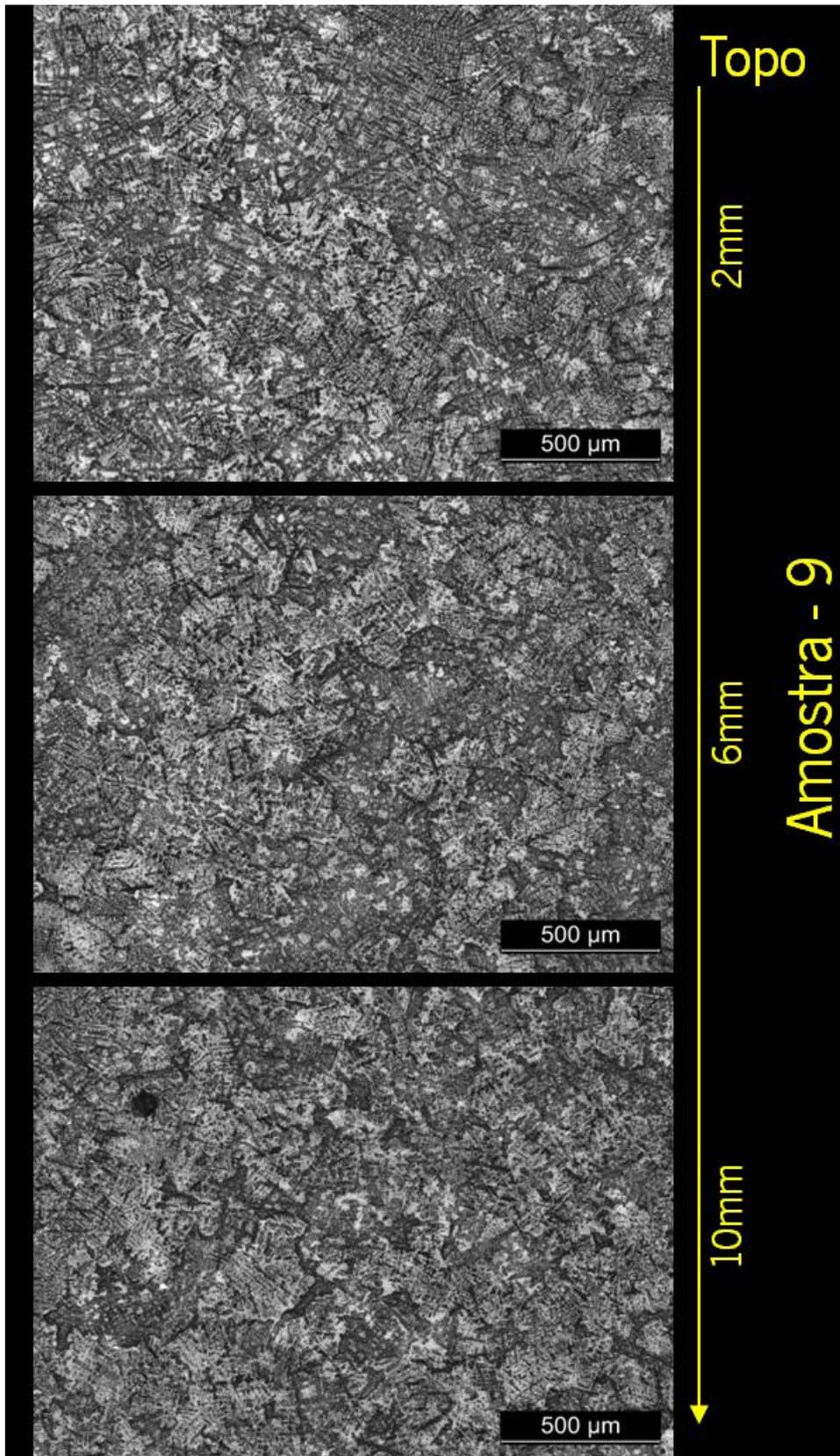


Figura 63: Amostra - 9 (Topo)

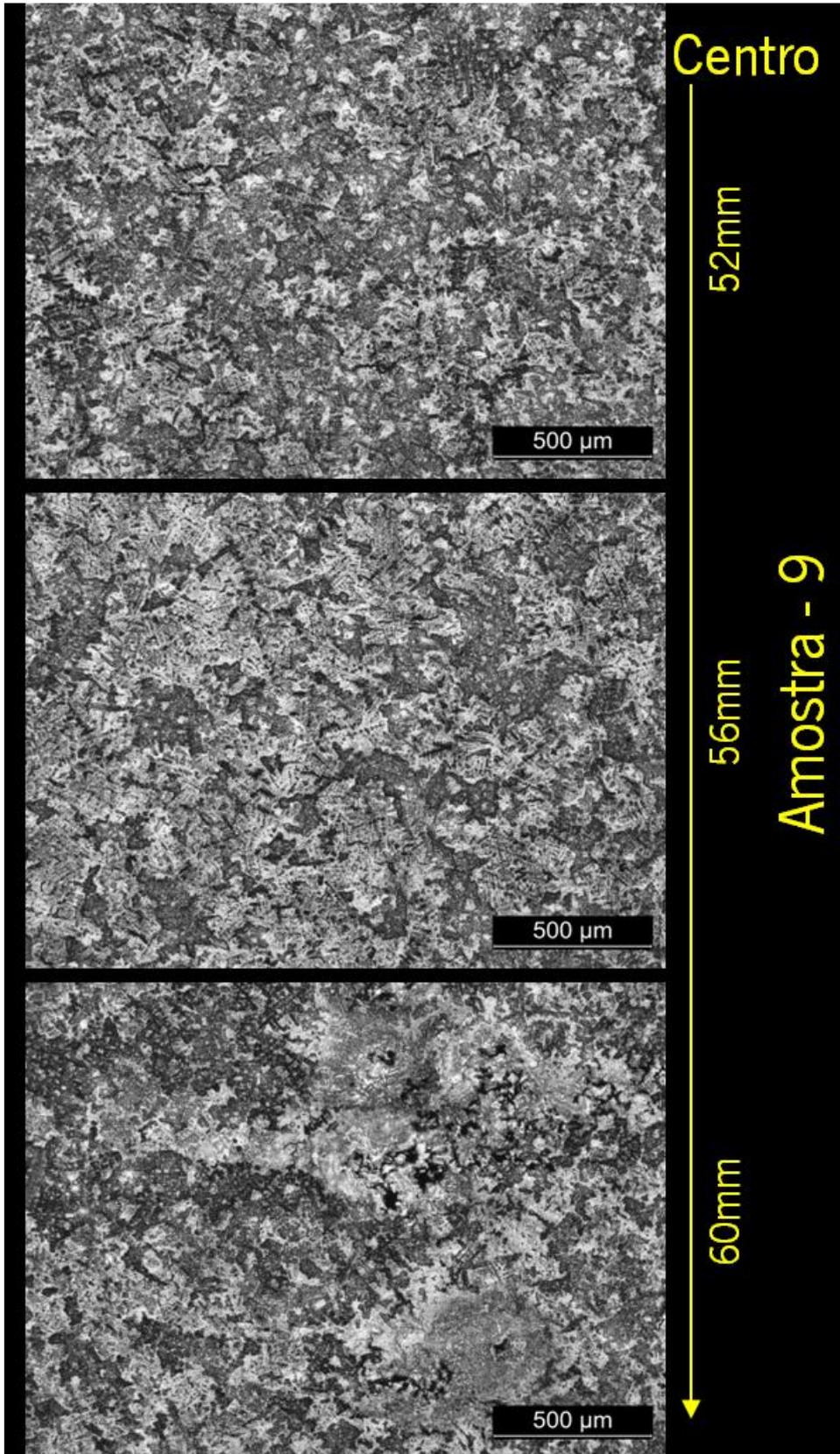


Figura 64: Amostra - 9 (Centro)

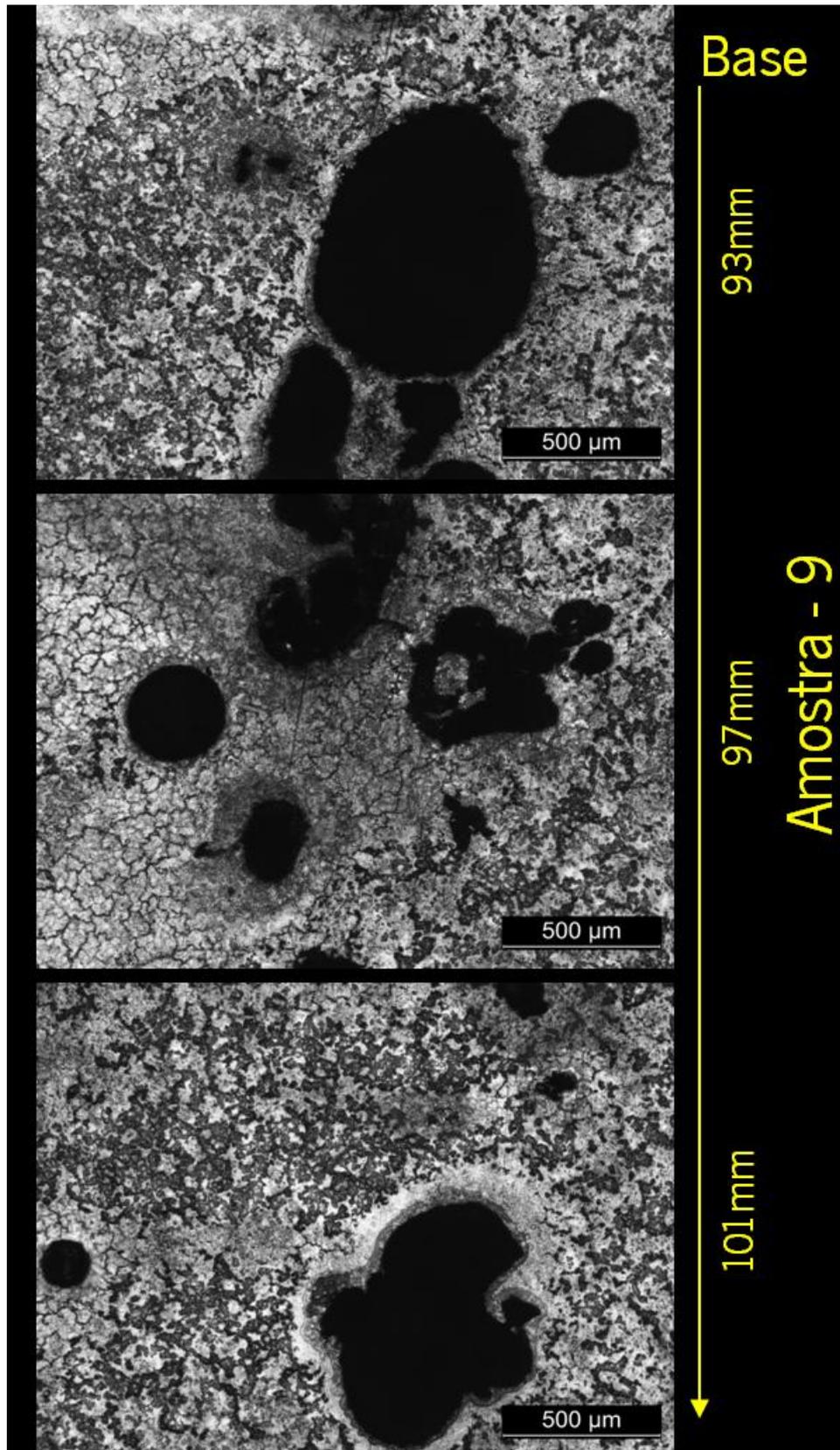
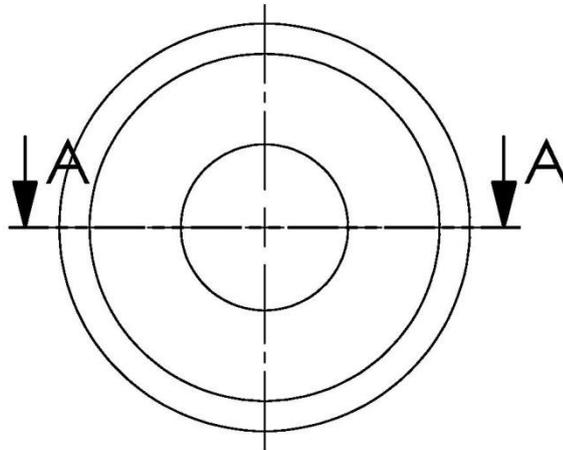


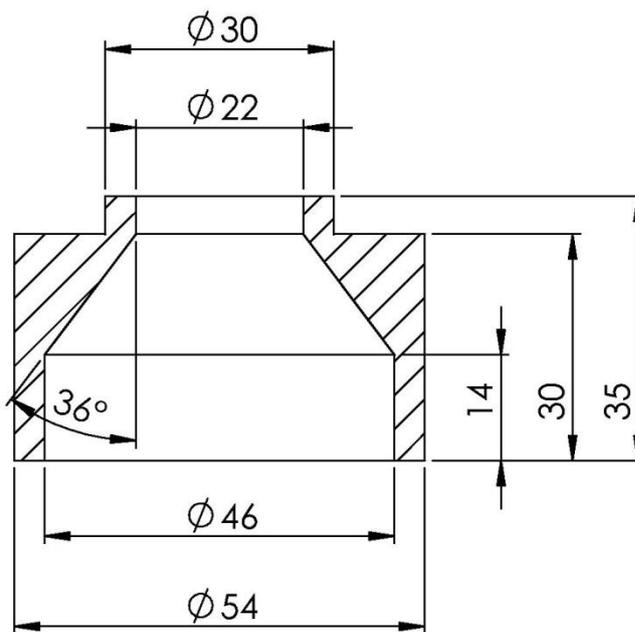
Figura 65: Amostra - 9 (Base)

Anexo VII.

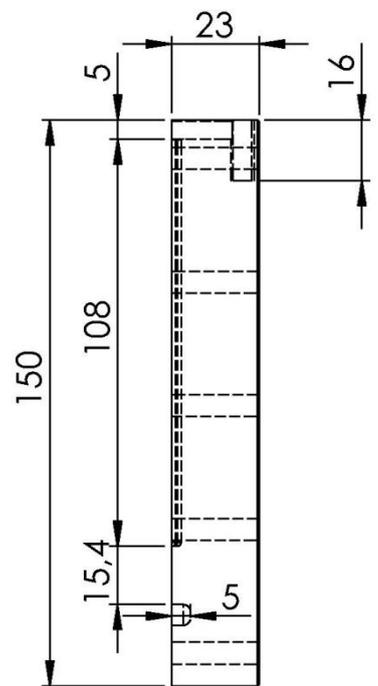
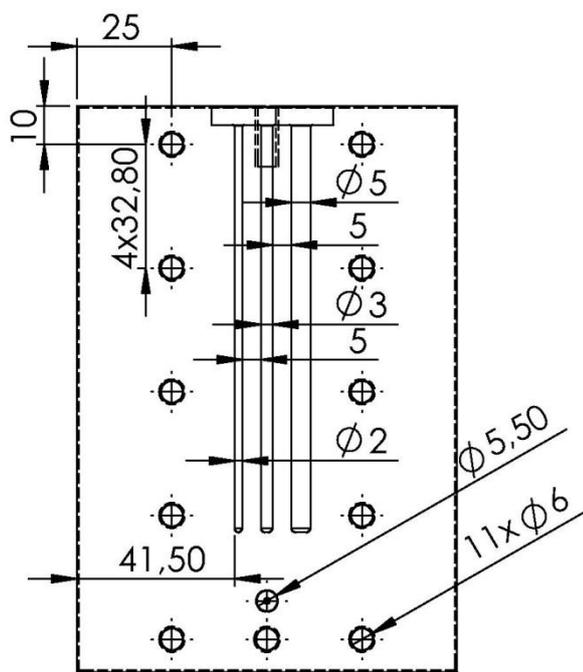
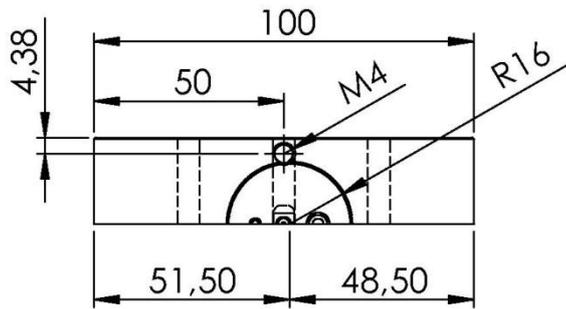
– Desenhos coquilha de 3 varetas



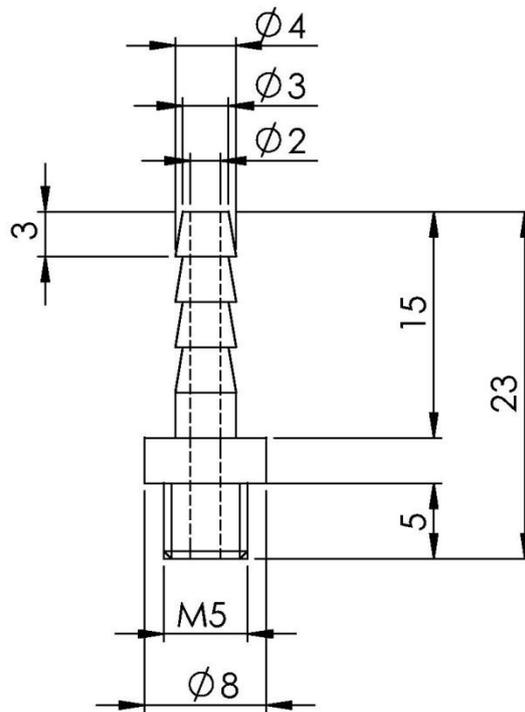
Secção A-A



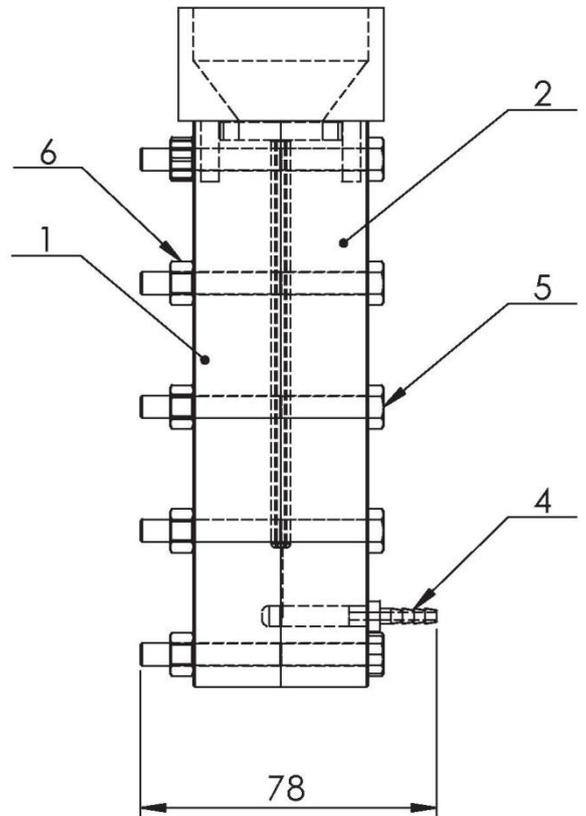
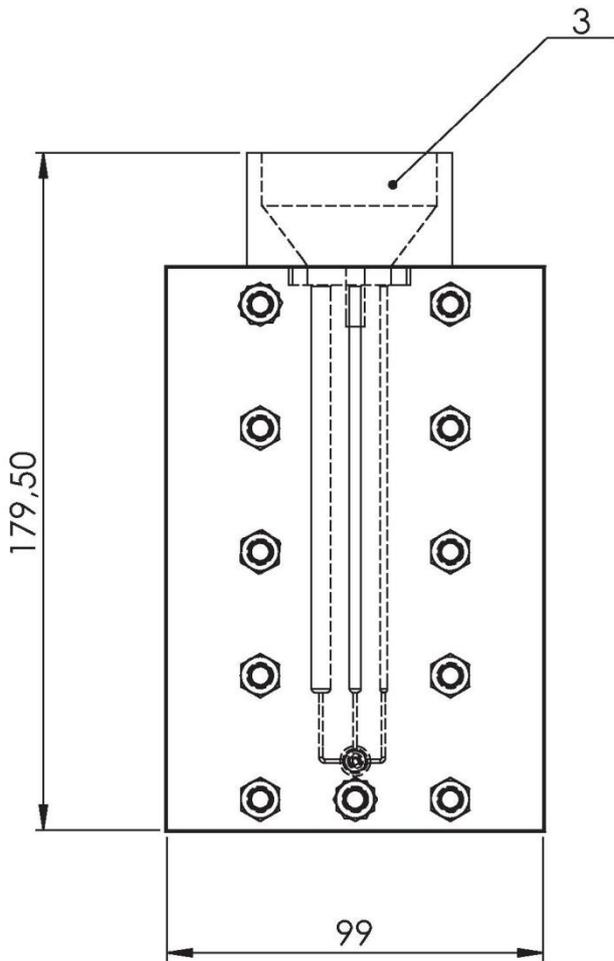
			Coquilha de 3 varetas	Universidade do Minho	
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala 1:1	Bacia de vazamento			Cq_3V	



Desenhou	J.Faria	11-11-2014	Coquilha de 3 varetas	Universidade do Minho
				Departamento de Engenharia Mecânica
				João Paulo Faria
Escala 1:2	Meia moldação sem saída de vácuo		Cq_3V (iii)	



			Coquilha de 3 varetas	Universidade do Minho	
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala 2:1	Ligação ao vácuo			Cq_3V (iv)	



11	Porcas sextavadas (M6)	ISO 4034	Aço	6			
11	Parafusos sextavados (M6x60x18)	ISO 4015	Aço	5			
1	Ligação para o vácuo	Cq_3V (iv)	Aço	4			
1	Bacia de vazamento	Cq_3V	Aço	3			
1	Meia modação com saída para vácuo	Cq_3V (ii)	Aço	2			
1	Meia modação sem saída para vácuo	Cq_3V (iii)	Aço	1			

Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI-ACABADO Nº DE MOLDE Nº DE MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
----	------------	------------------------------	----------	-----------	--	------	-------------

Desenhou	J.Faria	11-11-2014

Coquilha de 3 varetas

Universidade do Minho

Departamento de Engenharia Mecânica

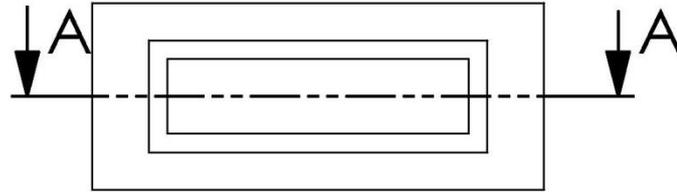
João Paulo Faria

Escala
1:2

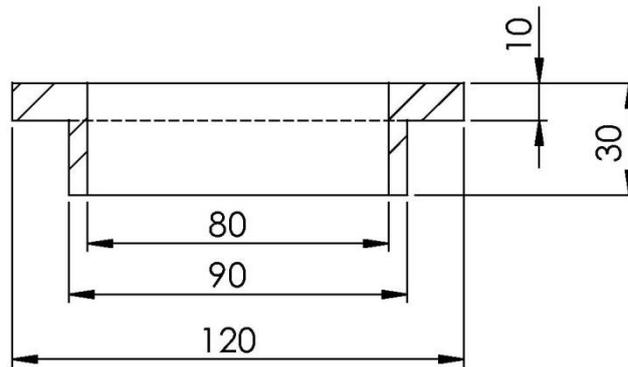
CONJUNTO

Cq_3V (cj)

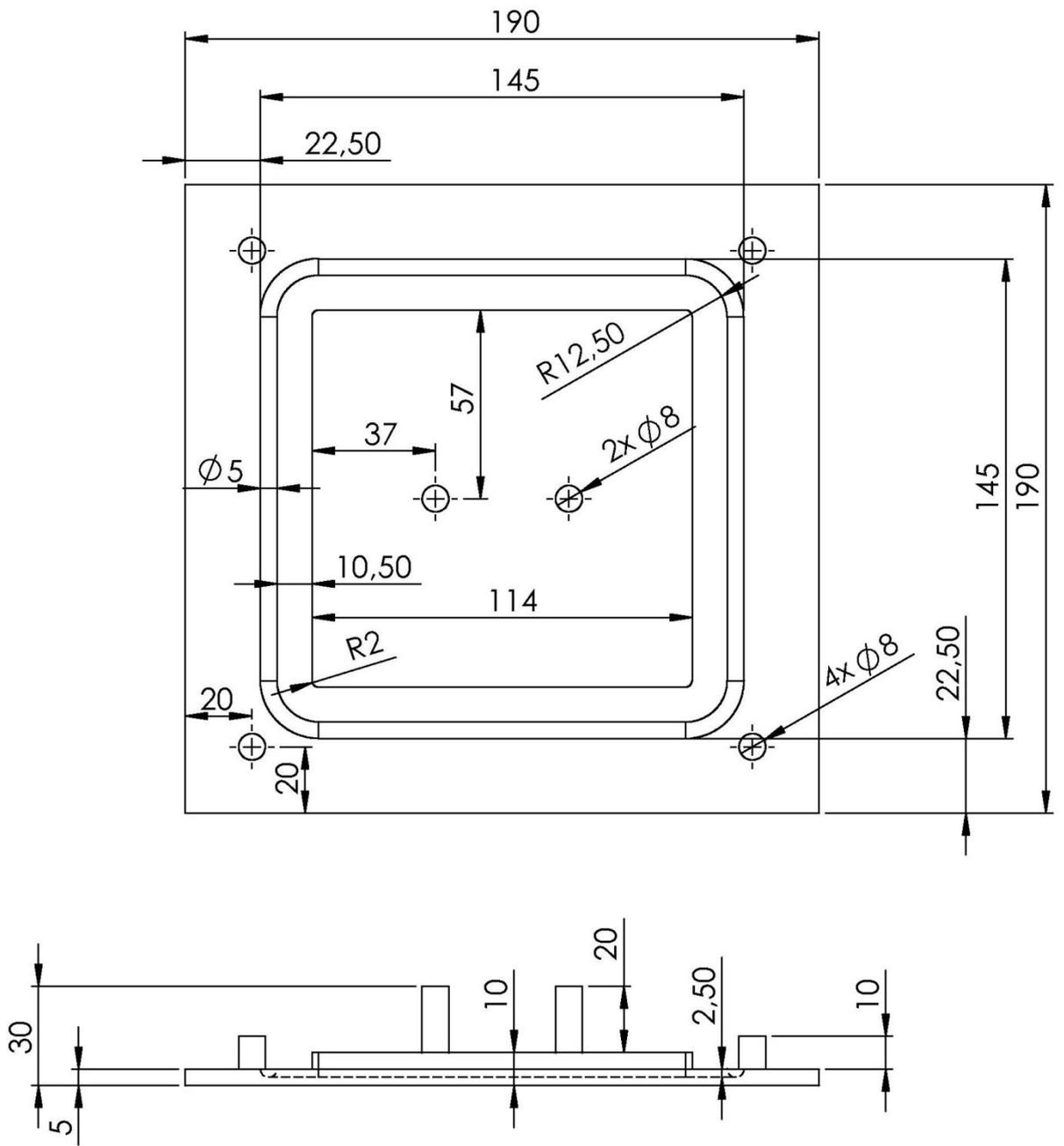
– Desenhos coquilha em câmara de baixa pressão



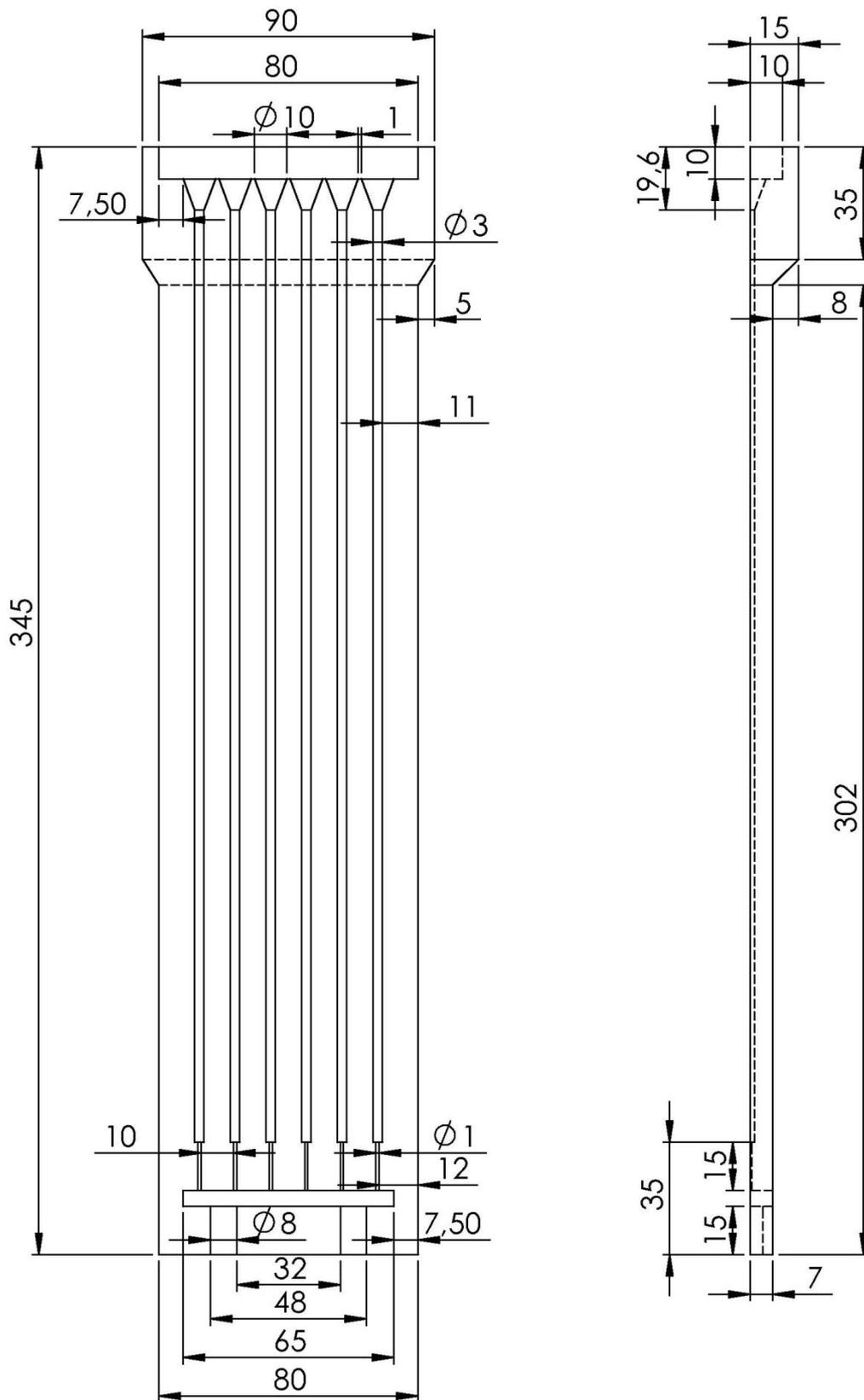
Secção A-A



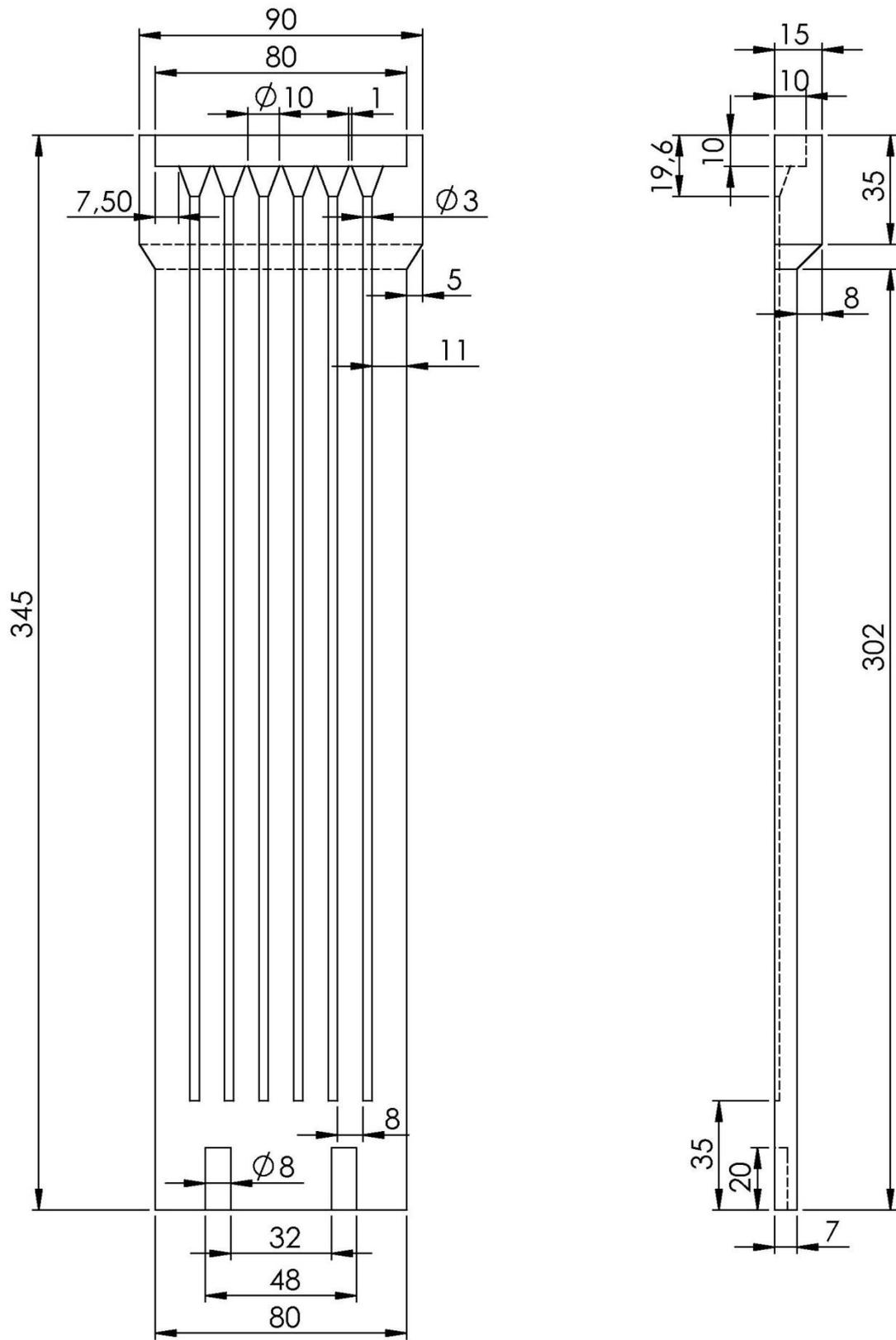
			Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho	
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala 1:2	Bacia de vazamento			CCBP_(i)	



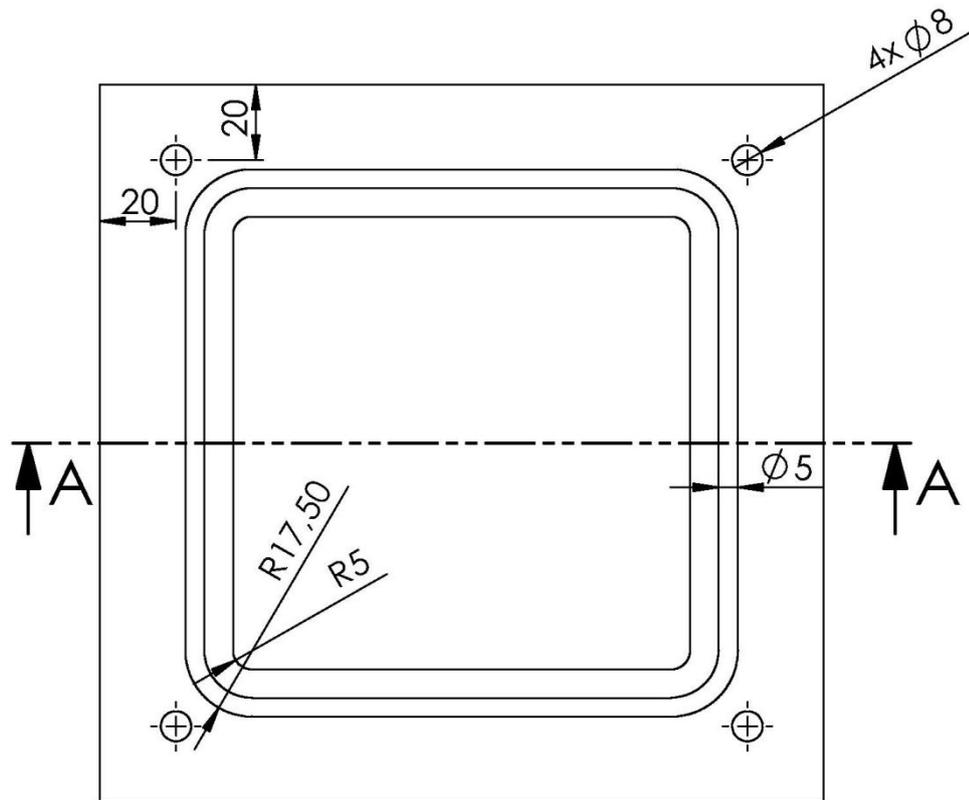
Desenhou	J.Faria	11-11-2014	Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho
				Departamento de Engenharia Mecânica
				João Paulo Faria
Escala 1:2	Base			CCBP_(ii)



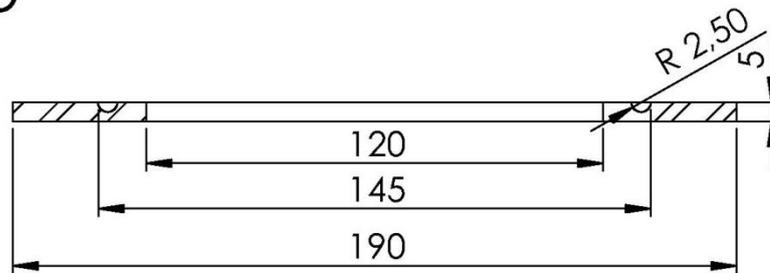
			Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica
				João Paulo Faria
Escala 1:2	Coquilha interior com escoamento de ar			CCBP_(iii)



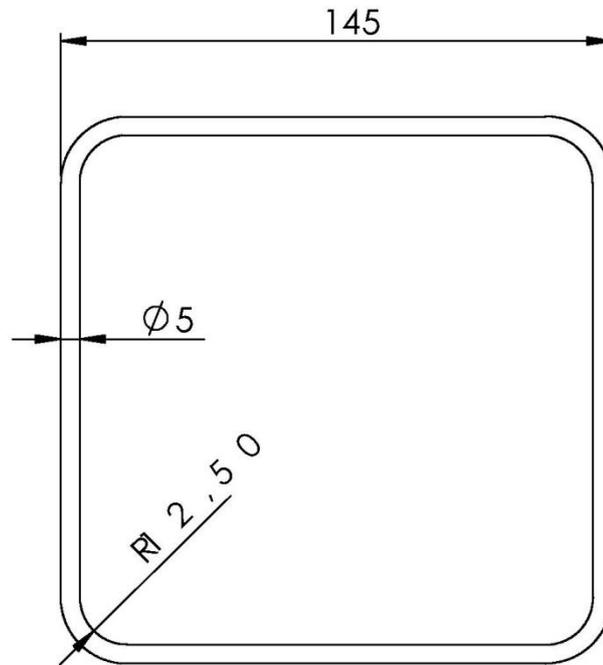
Desenhou	J.Faria	11-11-2014	Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho	
				Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala	1:2		Coquilha interior sem escoamento de ar	CCBP_(iv)	



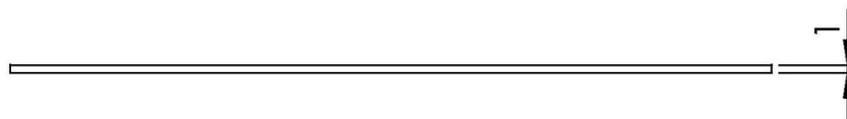
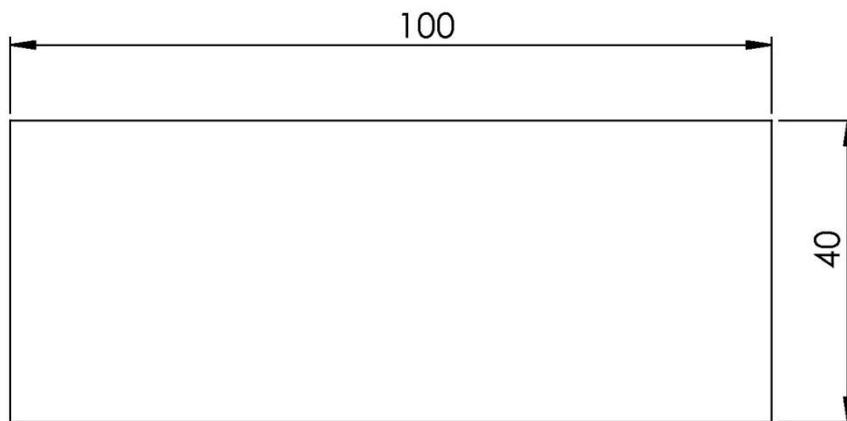
Secção
A-A



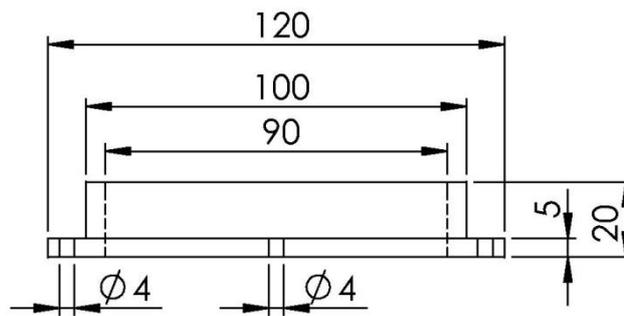
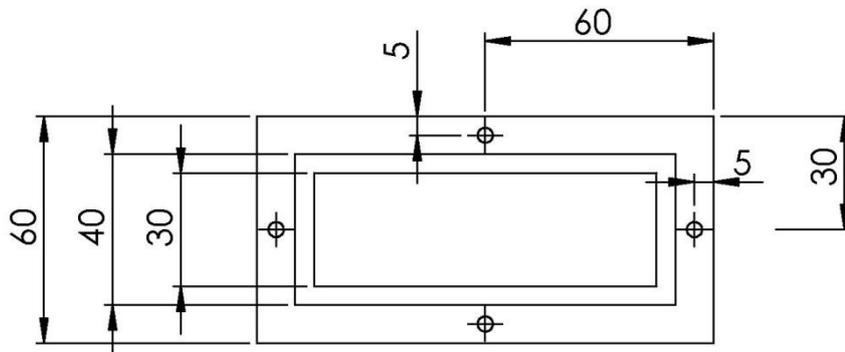
Desenhou	J.Faria	11-11-2014	Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho
				Departamento de Engenharia Mecânica
				João Paulo Faria
Escala 1:2	Emenda da base			CCBP_(v)



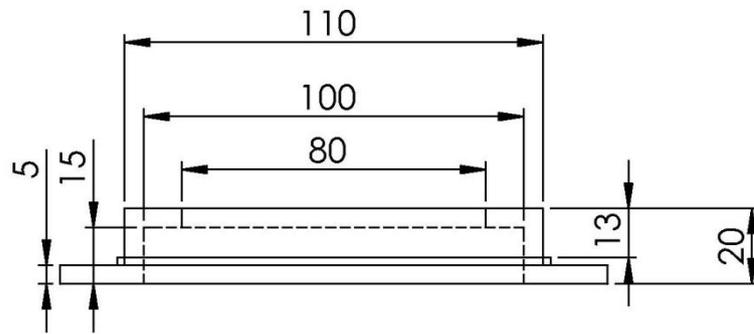
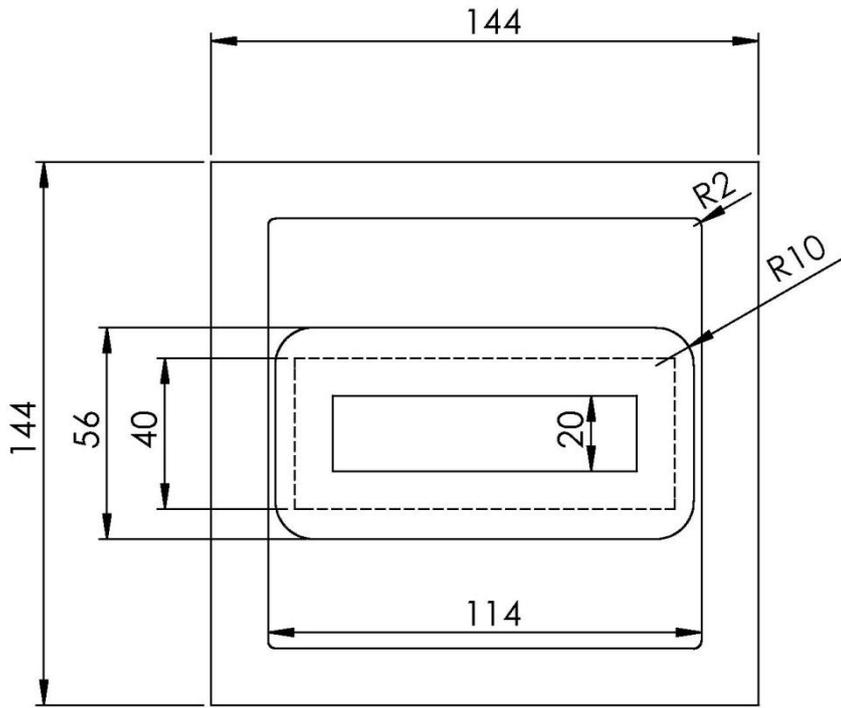
			Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho	
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala 1:2	O'ring			CCBP_(vi)	



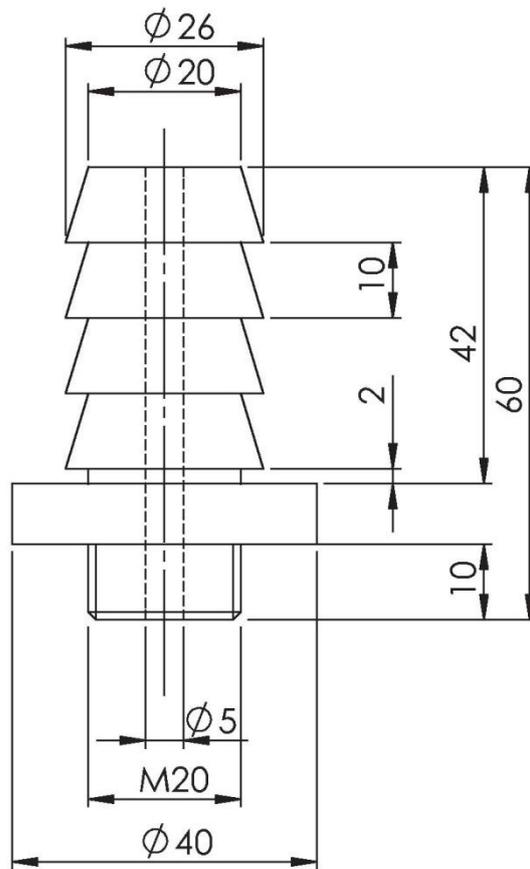
			Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho	
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala 1:1	Chapa de Estanho			CCBP_(vii)	



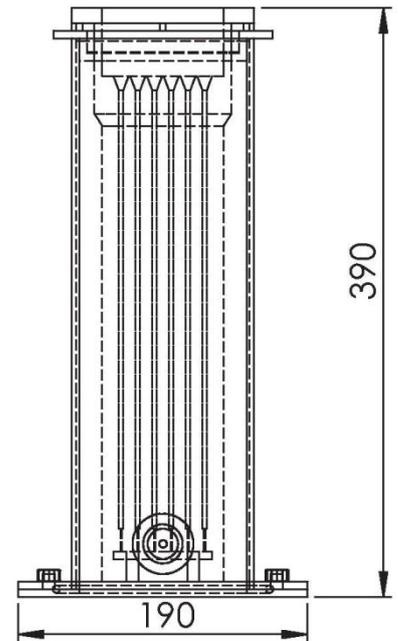
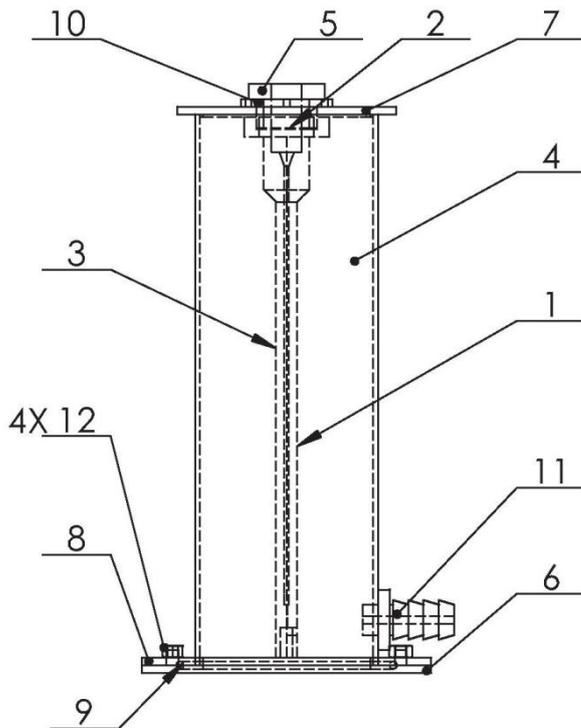
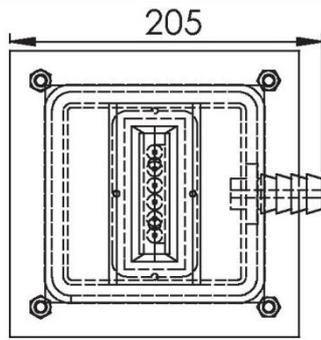
			Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho	
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala 1:2	Fixador			CCBP_(viii)	



Desenhou	J.Faria	11-11-2014	Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho				
				Departamento de Engenharia Mecânica				
				João Paulo Faria				
Escala 1:2	Topo			CCBP_(ix)				



			Coquilha em câmara de baixa pressão	Universidade do Minho	
Desenhou	J.Faria	11-11-2014		Departamento de Engenharia Mecânica	
				João Paulo Faria	
Escala 1:1	Bucha			CCBP_(x)	



4	Porcas sextavadas M8	ISO 4034	Aço	12			
1	Bucha	CCBP_(x)	Aço	11			
1	Base	CCBP_(viii)	Aço	10			
1	O'Ring	CCBP_(vi)	Polímero	9			
1	Emenda da base	CCBP_(v)	Aço	8			
1	Topo	CCBP_(ix)	Aço	7			
1	Base	CCBP_(ii)	Aço	6			
1	Bacia de vazamento	CCBP_(i)	Aço	5			
1	Tubo de aço com costura	EN 10305-5	Aço	4			
1	Coquilha interior s/escoamento de ar	CCBP_(iv)	Aço	3			
1	Chapa de estanho	CCBP_(vii)	Estanho	2			
1	Coquilha interior c/ escoamento de ar	CCBP_(iii)	Aço	1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI-ACABADO Nº DE MOLDE Nº DE MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

Desenhou	J.Faria	11-11-2014

Coquilha em câmara
de baixa pressão

Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Mecânica
João Paulo Faria

Escala
1:2

CONJUNTO

CCBP_(cj)
