



Beatriz Pereira da Guia Arraiano

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

Estudo de durabilidade de peças em alumínio vazado AlSi7Mg

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Teresa Morgado, Prof.^a Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira

Arguente(s): Prof. Doutor José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões

Vogal(ais): Prof.^a Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2017

Copyright

Estudo da durabilidade de uma peça em alumínio vazado

© Beatriz Pereira da Guia Arraiano, FCT-UNL, 2017

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Esta tese não teria sido concluída sem o apoio, orientação, dedicação e disponibilidade da minha orientadora, Professora Teresa Morgado. A si deixo o meu maior agradecimento. Na mesma linha, um sincero obrigado aos Professores do Núcleo de Tecnologia Industrial, em especial aos Professores Pamies Teixeira e José Ferreira pela ajuda prestada na programação dos controladores dos fornos e conselhos de melhoria da estrutura de suporte dos fornos. Ao Professor José Simões a amabilidade de nos ter emprestado o *kit* de fundição, sem o qual este trabalho teria sido mais complicado de realizar. Ao Professor Alexandre Velhinho todo o apoio e disponibilidade demonstrados, durante o processo de fabrico por fundição em moldação em areia, nomeadamente na fusão e vazamento, apoio na utilização do microscópio ótico de varrimento, e ajuda na compreensão dos resultados obtidos.

Um agradecimento especial ao Sr. Paulo e ao Sr. Campos, por toda a ajuda que me deram, tanto na construção do novo *Layout*, como na moldação e na preparação das amostras no laboratório. Ao Ricardo Ferreira, pela ajuda aquando da avaria do controlador do forno de fundição.

Ao meu avô agradeço a paciência que tem sempre comigo, e o trabalho que teve, mesmo já lhe custando, a fazer uma caixa de moldação com o respetivo modelo e gitos, para que eu pudesse vazar duas peças de cada vez e assim avançar mais rápido no meu trabalho. À minha avó, o seu amor e serenidade em todos os momentos.

Agradeço à minha querida família, principalmente aos meus pais pelo apoio e amor que sempre me deram, mesmo quando o caminho parecia menos direito, e à minha irmã, minha companheira em tudo.

Por último, mas não de menor importância, agradeço ao Afonso, pelo seu constante apoio e incentivo, e às minhas amigas de mais longa data, Rita, Cláudia, Filipa, Maria e Teresa. Às minhas colegas, Maria Inês, Catarina e Filipa, um obrigado por me terem acolhido tão bem nesta faculdade e terem estado presentes sempre que precisei, nem que fosse com uma gargalhada no final do dia.

Resumo

No âmbito desta tese, de entre as ligas de alumínio existentes, foi selecionada a liga AlSi7Mg. A adição de magnésio a ligas de alumínio-silício resulta em muito boas características de fundição, com excelentes propriedades após tratamento térmico. Esta liga também apresenta elevada resistência à corrosão e mantém um baixo nível de expansão térmica, o que é muito vantajoso no fabrico de motores ou outros componentes sujeitos a calor e/ou fadiga térmica durante a vida de serviço. É uma liga bastante utilizada quer na indústria automóvel como aeronáutica, sendo este um dos motivos que incentivaram este estudo.

Qualquer processo de fabrico leva à existência de defeitos inerentes ao próprio processo. Os defeitos intrínsecos ao processo de fundição por moldação em areia, influenciam a durabilidade das peças e devem por isso ser tidos em conta aquando do seu projeto.

Foram fabricadas três peças por vazamento em moldação em areia da liga de alumínio AlSi7Mg, no âmbito desta tese. Tendo as peças prontas, foram preparadas as respetivas amostras, seguindo-se a realização dos ensaios de dureza de Vickers, a inspeção de todas as amostras ao microscópio ótico, por forma a identificar a microestrutura e os vários tipos de defeitos de fabrico inerentes ao processo. Por último, foi realizado um varrimento a todas as amostras no microscópio ótico, cujas imagens foram tratadas realizando-se o estudo da distribuição de defeitos inerentes ao fabrico. Com os valores da dureza de Vickers e a área de defeito total de cada peça, calculou-se a durabilidade das peças recorrendo a modelos empíricos de previsão de tensão limite de fadiga.

Palavras-chave: AlSi7Mg, Fundição, Defeitos de Fundição, Ensaios de dureza, Previsão de vida à fadiga

Abstract

For this study, among the existing aluminium alloys, AlSi7Mg alloy was chosen. The addition of magnesium to aluminium-silicon alloys results in very good casting characteristics, with excellent properties after heat treatment. This alloy also presents high resistance to corrosion and maintains a low level of thermal expansion, which is very good in the manufacture of engines or other components subject to heat and/or thermal fatigue during their life cycle. It is widely used in both the automotive and aeronautics industries, and its study is therefore of the most importance.

As in any manufacturing process, the casting process leads to the existence of intrinsic defects that influence the durability of the parts and must therefore be considered in the parts design.

Three parts were produced by sand casting of AlSi7Mg aluminum alloy, within the scope of this thesis. After the parts were produced, the respective samples were prepared, followed by Vickers hardness tests, the inspection of all the samples under the optical microscope, in order to identify the microstructure and the various types of manufacturing defects inherent to the process. Finally, all the samples were scanned in the optical microscope, and the resulting images treated to obtain the total area of defect and then calculate a distribution of defects inherent to the parts manufacture. Having the Vickers hardness values and the total defect area of each part, the durability of the parts was calculated using empirical models of fatigue limit prediction.

Key-Words Aluminium Alloys, AlSi7Mg, Foundry Process, Furnace Manufacturing defects, Durability tests

Índice

Copyright	iii
Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Simbologia e siglas	xiii
1. Enquadramento, motivação e objetivos	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Motivação e objetivo	1
1.3. Estrutura	2
2. Revisão da literatura	5
2.1 Moldação em areia	5
2.1.1 Defeitos de fabrico.....	6
2.1.2 Seleção e caracterização das ligas para fundição	9
2.2 Fundição de alumínio	13
2.2.1 Introdução histórica	13
2.2.2 Interesse do processo	14
2.2.3 Métodos de previsão de vida	15
3. Laboratório de Fundição do DEMI	19
3.1 Construção do laboratório	19
3.2 Segurança no trabalho	24
3.3 Funcionamento dos fornos	27
4. Método experimental	29
4.1 Escolha da peça para moldação em areia.....	29
4.2 Dimensionamento do sistema de gitagem e alimentação	30
4.3 Tempo de aquecimento e de solidificação.....	36
4.4 Fabrico das peças e preparação das amostras	39

4.5 Ensaaios	43
5. Apresentação e análise dos resultados	45
5.1. Resultados de dureza	45
5.2. Análise da microestrutura e defeitos	48
5.3 Contabilização de defeitos	51
5.4 Previsão de vida	54
6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	57
Bibliografia	59
Anexo A – Ficha técnica da liga AlSi7Mg	61
Anexo B – Orçamento do material de construção	63
Anexo C – Desenhos técnicos	65
Anexo D – Orçamento do EPI	81
Anexo E – Instruções de controlo dos fornos	83

Índice de figuras

Figura 1 – Exemplificação de um sistema de gitagem utilizado no processo de fundição por moldação em areia (“Sand Casting,” 2008).....	5
Figura 2 – Imagens de microscópio ótico de uma bolha devido a inclusão de gás, à esquerda, e um defeito devido à contração, à direita (Jiang et al., 1999).....	7
Figura 3 – Microestrutura e porosidade da liga de alumínio fundido EN-AC 42000 T6 (G-ALSi7Mg0.6 T6) (Sonsino, 2005).	9
Figura 4 - Curva S-N da liga AlSi7Mg (Tajiri et al., 2014).	13
Figura 5 - Microestrutura das diferentes amostras do estudo de Tajiri, com uma taxa de arrefecimento decrescente, de A para C (Tajiri et al., 2014).	16
Figura 6 - Fotos do layout existente aquando do início deste trabalho a) vista de frente, b)vista lateral.	19
Figura 7 - Layout existente no Laboratório de Fundição e Soldadura do DEMI, desenhado em <i>SolidWorks</i>	20
Figura 8 - Projeto do layout tendo em conta questões de Segurança e Higiene no Trabalho.	22
Figura 9 - Exemplificação de uma caixa de moldação, identificando-se a altura h (Askeland & Fulay, 2009).....	22
Figura 10 - Foto da estrutura de suporte dos fornos. a) Vista geral. b) Plataforma principal de trabalho.....	23
Figura 11 - Sinalização indicativa do risco inerente ao trabalho com os fornos.....	25
Figura 12 - Sinalização indicativa do EPI a utilizar pelos operadores.....	26
Figura 13 - Sistema de escoamento de gases instalado no laboratório de fundição do CENIMAT. a) Vista geral; b) Vista em pormenor.....	26
Figura 14 - a) Pormenor das resistências da câmara do forno b) Câmara do forno (Russo, 2012).	27
Figura 15 - a) controlador RKC REX P96; b) controlador RKC REX P300 (Russo, 2012).	28
Figura 16 - Peça modelo desenhada em <i>SolidWorks</i> a) inteira, b) em corte, identificando-se as descontinuidades geométricas.	29
Figura 17 - Dimensões da peça modelo.....	30
Figura 18 - Representação do sistema de gitagem e alimentação.....	31
Figura 19 - Representação dos raios de atuação dos alimentadores, nas zonas críticas.	32

Figura 20 - Relações sugeridas pelo Método dos Módulos para o dimensionamento de um alimentador atmosférico prismático. (Ferreira, 2010)	33
Figura 21 - Relações sugeridas para o dimensionamento do alimentador maior a) e do alimentador menor b), no caso específico deste trabalho.	33
Figura 22 - Gito de vazamento utilizado.....	35
Figura 23 - Sistema de gitagem proposto.	35
Figura 24 - Curva de aquecimento do vazamento A.	36
Figura 25 - Curva de aquecimento dos vazamentos B e C.	37
Figura 26 - a) Caixa de moldação pronta a ser aberta, retirando-se primeiro os gitos; b) caixa de moldação aberta, já com o macho posicionado.	39
Figura 27 - a) Caixa de moldação fechada, pronta para o vazamento, já colocada na bandeja de areia; b) Caixa de moldação após o vazamento, visualizando-se que o metal já preencheu a cavidade do molde.	40
Figura 28 - Peça ainda com o excesso de material do sistema de gitagem.	40
Figura 29 - Peça com os vários cortes realizados e identificação das zonas a estudar.	41
Figura 30 - Identificação das zonas da peça a estudar.	41
Figura 31 - a) Resina e endurecedor utilizados; b) Copos de medida e de forma.	42
Figura 32 - a) Processo de polimento; b) Amostras posicionadas na máquina de polimento.....	42
Figura 33 - Processo de polimento em pormenor.	43
Figura 34 - Microscópio ótico de varrimento <i>Leica DMI5000 M</i>	44
Figura 35 - Gráfico dos valores de dureza de Vickers da amostra A.....	46
Figura 36 - Gráfico dos valores de dureza de Vickers da amostra B.....	46
Figura 37 - Gráfico dos valores de dureza de Vickers da amostra C.....	47
Figura 38 - Microestrutura do material, com uma ampliação de 20x, identificando-se o alumínio primário e a fase eutética Al-Si, e alguma porosidade. Amostra A14 100 µm.	48
Figura 39 - Defeito presente na amostra A11, com uma ampliação de 5x.	49
Figura 40 - Defeitos encontrados na amostra A11 - a) Borda interior; b) centro da amostra.....	49
Figura 41 - Defeitos encontrados na amostra A12 - a) Borda interior; b) centro da amostra.....	50
Figura 42 - Defeitos encontrados na amostra A13 - a) Borda inferior; b) centro da amostra.....	50

Figura 43 - Defeitos encontrados na amostra A14 - a) Borda interior; b) zona acima da borda interior; c) centro da amostra.	51
Figura 44 - Exemplificação do tratamento de imagem efetuado com o programa <i>ImageJ</i> – a) imagem de microscópio ótico original; b) imagem tratada no programa.....	51
Figura 45 - Distribuição de defeitos na peça A.....	52
Figura 46 -Distribuição de defeitos na peça B.....	53
Figura 47 - Distribuição de defeitos na peça C.....	53
Figura 48 - Representação do valor de tensão limite de fadiga (σ_w) calculado, sobre a curva S-N de Tajiri. (Tajiri et al., 2014).....	55

Índice de tabelas

Tabela 1 - Composição química, em %, da liga AlSi7Mg, segundo a análise realizada por Alexandre Velhinho. (Velhinho, 2003).....	11
Tabela 2 - Propriedades mecânicas da liga AlSi7Mg (Anexo A).	11
Tabela 3 - Propriedades físicas da liga AlSi7Mg (valores indicativos sujeitos às normas UNI EN e ex DIN), Anexo A.	12
Tabela 4 - Características técnicas, indicações qualitativas (Anexo A).	12
Tabela 5 - Seleção do EPI consoante o risco analisado.	24
Tabela 6 - Relações geométricas dos anéis da peça.	31
Tabela 7 - Cálculo do peso da peça e dos alimentadores.....	34
Tabela 8 - Cálculo das secções dos vários componentes do sistema de gitagem proposto.....	34
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de dureza de Vickers às amostras A, B e C.....	45
Tabela 10 - Teste de normalidade aos resultados dos ensaios de dureza de Vickers.	47
Tabela 11 - Resultados da área total de defeito e do cálculo da tensão limite de fadiga para cada peça, utilizando a equação 2.2, tendo em conta a dureza média das três amostras.....	54
Tabela 12 - Resultados da área total de defeito e do cálculo da tensão limite de fadiga para cada peça, utilizando a equação 2.2, tendo em conta a dureza de cada amostra.	54

Simbologia e siglas

\sqrt{area} – tamanho máximo de defeito estimado por estatísticas de valor extremo

σ_w – tensão limite de fadiga

a – alimentadores

A – área da superfície a partir da qual o calor é transferido

b_m – difusividade térmica do molde

c - calor específico do molde ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

c – canais de distribuição

c_m - calor específico do metal ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

D – diâmetro maior

d – diâmetro menor

e – espessura

H_0 – hipótese nula

HV – dureza de Vickers

k - condutividade térmica do molde ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

L - calor latente de fusão ($J \cdot kg^{-1}$)

L – comprimento

m – constante de Chvorinov

p – peça

P-Value – probabilidade de significância

R – razão de tensões; raio de ação dos alimentadores

S – área da secção/superfície

T - temperatura de fusão do metal (K)

T_i – temperatura na interface molde-metal ($^{\circ}C$)

T_0 - temperatura inicial do molde (K)

V – volume da peça a fundir

α – nível de significância

ΔT_s – sobreaquecimento (K),

ρ - densidade do molde ($kg \cdot m^{-3}$)

ρ_L – densidade do metal (g/cm^3)

ρ_m - densidade do metal ($kg \cdot m^{-3}$)

HV – dureza de Vickers

Siglas

CENIMAT – Centro de Investigação de Materiais

DEMI – Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

EBSD - *Electron Back Scatter Diffraction*

EPI – Equipamento de Proteção Individual

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

LTI – Laboratório de Tecnologia Industrial

OES – optical emission spectroscopy

UNL – Universidade Nova de Lisboa

1. Enquadramento, motivação e objetivos

1.1 Introdução

O processo de fundição teve uma grande importância na evolução da indústria. O seu uso começou com a necessidade de fabricar armas, ferramentas e utensílios agrícolas, quando o Homem começou a dominar a técnica, ainda que de modo muito rudimentar. Inicialmente fundiam-se apenas metais de baixo ponto de fusão como o cobre, o estanho ou o bronze mas, com a evolução das técnicas de fundição, começaram a fundir-se metais com pontos de fusão mais elevados, como o ferro. Com o tempo, a fundição evoluiu desde um processo "quase artesanal" para um processo tecnológico, em alguns casos, de elevada complexidade e valor acrescentado. Os custos com energia, bem como aspetos ambientais e de higiene e segurança dos trabalhadores, e a necessidade de recorrer a operações de acabamento constituem a maior limitação deste processo (Russo, 2012). No entanto, continua a ser a melhor opção para o fabrico de peças de grandes dimensões e/ou complexidade, difíceis de obter por outros processos.

Numa vertente análoga, tem-se a crescente procura, por parte das indústrias automóvel e aeroespacial, por transportes mais eficientes em termos de combustível, de modo a reduzir o consumo de energia e a poluição atmosférica. Este desafio leva as empresas a procurarem materiais mais leves e com boas propriedades mecânicas, tais como, resistência mecânica e resistência à corrosão. As propriedades características do alumínio – uma elevada relação rigidez/peso, boa resistência à corrosão e possibilidade de ser reciclado - tornam-no o candidato ideal para substituir materiais mais pesados, como o aço ou o cobre.

1.2 Motivação e objetivo

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo da durabilidade de peças fabricadas por fundição por moldação em areia de uma liga de alumínio, AlSi7Mg. Para tal, o projeto das peças, controlo do seu processo de fabrico, ensaios de dureza, ensaios de caracterização dos seus defeitos intrínsecos, estudo de modelos numéricos de previsão de vida tendo em conta os parâmetros experimentais obtidos, integram etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Com o intuito de criar um laboratório de fundição no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), no âmbito desta tese consta, também, o projeto de um novo *layout*, no Laboratório de Tecnologia Industrial (LTI) do DEMI para a correta utilização dos fornos existentes, tendo em conta fatores de Higiene e Segurança no Trabalho. A motivação para a elaboração desta tese foi o facto de o estudo da previsão de vida à fadiga de peças fabricadas por fundição de alumínio ser atualmente de grande interesse técnico-científico. A aplicabilidade dos resultados previstos nesta dissertação será uma mais valia para a comunidade científica internacional e para as indústrias do setor automóvel e aeroespacial, entre outras, que recorrem a peças/ componentes mecânicos em ligas de alumínio, com formas geométricas complexas.

1.3. Estrutura

Da estrutura desta dissertação fazem parte seis capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento, motivação, objetivo e estrutura do presente documento.

Na revisão bibliográfica, capítulo 2, foi abordado o processo de fundição por moldação em areia, dando ênfase aos defeitos de fabrico e à seleção e caracterização das ligas de alumínio aptas a este processo. Foi apresentado também um estado de arte tendo em conta a história da fundição de alumínio, o interesse deste processo e os métodos de previsão de vida à fadiga da liga AISi7Mg.

No capítulo 3 é feito um levantamento das normas vigentes na lei relativas a Higiene e Segurança no Trabalho, com o intuito de criar um novo *layout* no laboratório de fundição no LTI do DEMI, e otimizar o funcionamento dos equipamentos existentes, nomeadamente os fornos. O objetivo desta melhoria é permitir a correta utilização destes equipamentos para a produção de protótipos em ligas de alumínio ou outros materiais. É apresentado o projeto de melhoria, com o respetivo resultado, as medidas de segurança no trabalho que se sugerem dadas as diretivas encontradas no levantamento referido, e o modo de funcionamento dos fornos.

No capítulo 4, é descrito o método experimental seguido no âmbito deste estudo. Apresenta-se a peça escolhida para realizar o trabalho, os cálculos referentes ao sistema de gítagem necessário ao seu vazamento, o cálculo dos tempos de aquecimento e solidificação, a preparação das amostras, os ensaios de dureza e, por fim, o método utilizado no tratamento das imagens de microscópio ótico obtidas.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados dos ensaios de dureza realizados, apresentam-se e analisam-se as imagens de microscópio ótico obtidas, bem como os

resultados da contabilização de defeitos realizada e o cálculo da previsão de vida das peças.

No capítulo 6 encontram-se as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão da literatura

2.1 Moldação em areia

A fundição por moldação em areia é um processo de fabrico no qual as peças metálicas são criadas pelo vazamento do metal fundido numa cavidade com a forma pretendida. A cavidade do molde é criada imprimindo um modelo numa caixa de moldação, com uma mistura específica de areia (areia de fundição). Uma vez que a impressão do modelo forma a cavidade (molde), o padrão cria a forma externa da peça fundida. Se a peça tiver regiões internas ocas ou reentrâncias, estas são formadas por machos, que são fabricados separadamente e depois colocados na cavidade do molde e seguras em prensos (Wang, Stoll, & Conley, 2010).

O modelo, que pode ser feito de madeira, metal entre uma variedade de outros materiais, tem a forma externa da peça que vai ser vazada, mas tem em conta uma tolerância dimensional para compensar a contração do metal fundido durante a solidificação e arrefecimento à temperatura ambiente, bem como os acabamentos finais, como a maquinagem (Wang et al., 2010).

Na figura 1 é apresentado um exemplo de uma peça em vazamento, com o sistema de gitagem e o macho perfeitamente identificado.

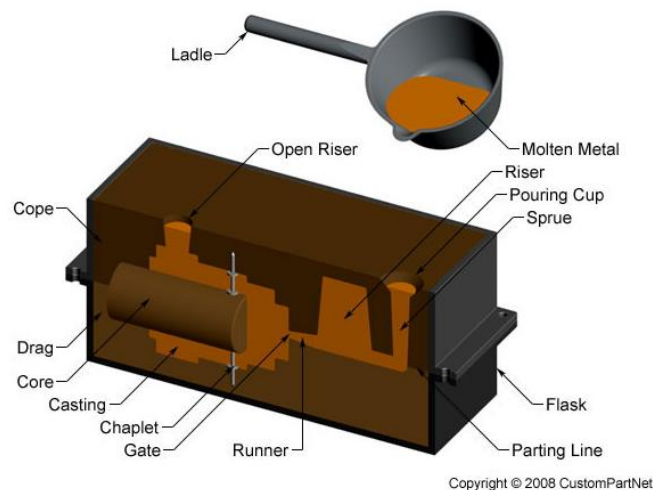


Figura 1 – Exemplificação de um sistema de gitagem utilizado no processo de fundição por moldação em areia (“Sand Casting,” 2008).

Os fatores importantes a ter em conta de modo garantir a qualidade da peça obtida pelo processo de fundição por moldação em areia, são: o tipo de areia; o metal a vazar, a moldação e o projeto do sistema de gitagem (Nekere & Singh, 2012).

Existem vários processos de fundição com moldação em areia. A areia pode ser de Sílica, produzida pela decomposição do granito. Esta areia é uma das mais frequentemente utilizadas nas fundições. Qualquer que seja a areia escolhida, deve cumprir certos requisitos (José M. G. de Carvalho Ferreira, 2010):

- Estabilidade térmica e dimensional a elevadas temperaturas;
- Distribuição de forma e tamanho de partículas adequado;
- Não apresentar reatividade química com o metal fundido;
- Não apresentar fácil molhabilidade com o metal em fusão;
- Estar livre de substâncias de partículas de baixo ponto de fusão;
- Estar livre de produtos que gerem gases às altas temperaturas envolvidas;
- Estarem disponíveis a baixos fatores de custo;
- Apresentarem uma composição uniforme;
- Serem compatíveis com os aglomerantes utilizados.

Além dos referidos, outros fatores podem afetar o processo de fundição. A variação da temperatura ambiente e humidade do ar, a temperatura e velocidade de vazamento são geralmente os mais críticos. O controlo desses fatores deve ser feito de acordo com cada caso, pois estes variam com o tipo de material a fundir, a dimensão das peças e a areia utilizada na moldação. Por exemplo, a temperatura de vazamento varia com o material das peças fundidas, e a humidade gera gases que podem dissolver-se no metal durante a fusão e o vazamento (Nekere & Singh, 2012).

2.1.1 Defeitos de fabrico

Vários autores têm estudado a influência dos defeitos resultantes do processo de fundição na durabilidade das peças fabricadas. No entanto cada um estudou casos específicos, e tirou conclusões que, embora importantes, nem sempre podem ser generalizadas para outros casos. De seguida apresenta-se alguns casos estudados relevantes.

Jian e seus colaboradores (Jiang, Bowen, & Knott, 1999) realizaram testes de a uma liga AlSi7Mg padrão (LM25), e inspecionaram defeitos de fundição de modo a estudar a sua influência na vida útil das peças fabricadas por fundição, bem como no comportamento de iniciação de fissuras. Os ensaios de fadiga foram realizados sob flexão de quatro pontos com uma razão de tensões de $R=0,1$ usando uma máquina de ensaios de fadiga, com provetes em bruto e polidos obtidos por fundição por moldação

em areia e em provetes obtidos por fundição sob pressão. Os autores chegaram a algumas conclusões relevantes. Em primeiro lugar, verificaram que os defeitos superficiais dominaram o início da fadiga, revelando-se a única origem de propagação de fissuras nas amostras fabricadas por moldação em areia, com elevada rugosidade superficial (em bruto). Os autores, constatando que a profundidade dos poros era idêntica ao valor máximo da distância pico-vale obtida na medição da rugosidade da superfície, concluíram também que uma diminuição da rugosidade superficial iria reduzir a dimensão dos poros, aumentando a resistência ao início da fissura, e aumentando a vida de fadiga. Em segundo lugar, no que diz respeito às amostras polidas, os poros (ver figura 2) resultantes da contração foram os iniciadores da propagação fissura. O aumento do tempo de vida à fadiga foi atribuído a um período mais longo de início da fissura. Os autores afirmaram que não é tão fácil como esperado para uma microfissura que tem início num poro crescer até o tamanho do poro e sugerem que o período de início de fissura poderia fazer parte da previsão do tempo de vida de materiais com defeitos tipo porosidade. Em terceiro lugar, os autores afirmaram a importância dos filmes de óxido no tempo de vida de peças fundidas, uma vez que estes também revelaram agir como origem de fissuras. Acredita-se que estas películas de óxido se formam devido à turbulência superficial durante o vazamento. Uma melhoria no processo de vazamento de modo a reduzir a turbulência da superfície poderia diminuir o nível de películas de óxido nos materiais fundidos e, assim, melhorar a sua resistência à fadiga. Esta última conclusão foi feita para uma peça de fundição de pressão, porém conclusões similares foram feitas por outros autores, como M. Divandari e J. Campbell, para peças de moldação em areia (Jiang et al., 1999).

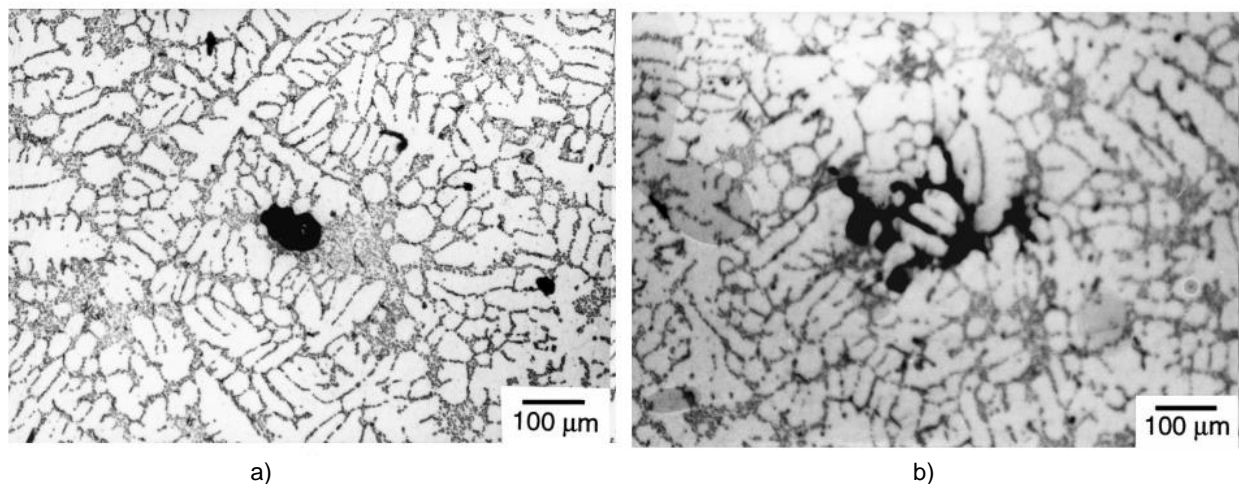


Figura 2 – Imagens de microscópio óptico de uma bolha devido a inclusão de gás, à esquerda, e um defeito devido à contração, à direita (Jiang et al., 1999).

Buffière e seus colaboradores (Buffière, Savelli, Jouneau, Maire, & Fougères, 2001) estudaram o desenvolvimento de fissuras de fadiga numa liga de alumínio, AS7G03, em provetes obtidos por fundição sob pressão, relacionando-as com a cristalografia, usando a técnica de “Electron Back Scatter Diffraction - EBSD”, com foco na porosidade. Segundo estes autores, as ligas de alumínio fundido apresentam sempre um certo nível de porosidade quando são utilizadas técnicas simples de fundição. Isto é devido à contração do material durante a solidificação e à facilidade com que o hidrogénio se dissolve no metal fundido. Esta porosidade tem uma grande influência nas propriedades mecânicas do material. Por exemplo, os autores afirmam que uma porosidade com fração volumétrica de 1% pode levar a uma redução de 50% na vida à fadiga e 20% da tensão de cedência em comparação com a mesma liga com uma microestrutura similar, mas sem poros. Os autores também afirmam que, na maioria dos casos as fissuras de fadiga têm início num poro, independentemente da carga ou condições de tensão dos ensaios de fadiga. O seu trabalho também mostrou que o número de ciclos necessários para iniciar uma fissura depende das condições de carga, mas geralmente varia de quase 0% (iniciação quase imediata) a menos de 10% da vida de fadiga.

Sonsino (Sonsino, 2005) estudou um caso de falhas precoces em caixas de velocidades de alumínio fundido (G-ALSi10 Mg T6) do setor ferroviário. Estes componentes, sujeitos a tensões estocásticas complexas durante o funcionamento, deveriam suportar uma vida útil de pelo menos 30 anos sem danos. Para reduzir o peso, estas caixas são produzidas em alumínio, sendo o processo de fabrico fundição por moldação em areia. O autor realizou uma análise completa do caso de ruína, que incluiu: medição de tensões de serviço das caixas redutores; interpretação e avaliação das tensões medidas; ensaios laboratoriais em amostras e provetes retirados das caixas de velocidade nomeadamente, análise de defeitos, ensaios de tração, ensaios de fadiga e ensaios de propagação de fissuração; e análise de propostas de melhorias de projeto. O autor concluiu que o projeto inicial não considerou as tensões de serviço às quais as caixas iriam estar sujeitas nem as tensões admissíveis da liga tendo em conta o processo de fabrico, apontando esta omissão como a principal razão para as falhas. Uma vez que as peças fabricadas por moldação em areia têm geralmente formas complexas, cada projeto deve contar com um estudo prévio considerando os dados de serviço, a forma do componente, a seleção de materiais e o controlo de qualidade em simultâneo. No seu caso de estudo, o desenho das peças não foi otimizado, os defeitos admissíveis (ver Figura 3) não consideraram o desenho e o material escolhido não era o mais indicado para o trabalho. Assim, foi sugerido pelo autor que o projeto fosse modificado para que as caixas suportassem melhor as tensões de serviço: o material

deveria ser alterado de uma liga G- AlSi10 Mg T6 para uma G- AlSi7Mg T6 , devido à maior facilidade de fundição do último, e deveria ser implementado o controlo de qualidade no processo de fabrico.

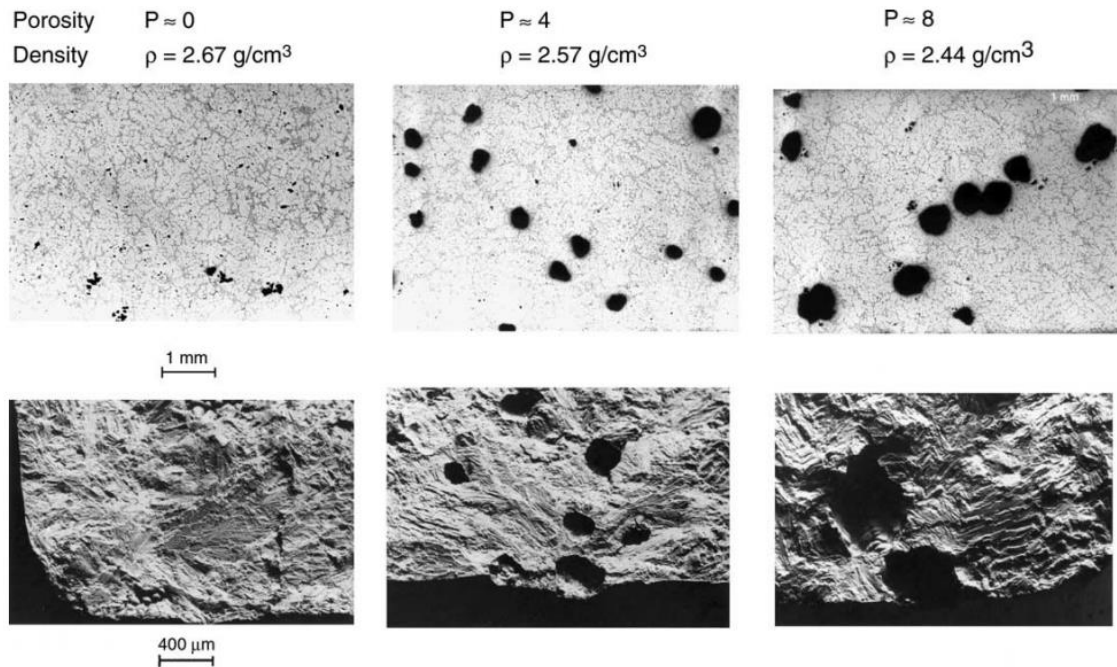


Figura 3 – Microestrutura e porosidade da liga de alumínio fundido EN-AC 42000 T6 (G- AlSi7Mg0.6 T6) (Sonsino, 2005).

2.1.2 Seleção e caracterização das ligas para fundição

Dependendo das propriedades desejadas, existem especificações para a composição química das ligas de alumínio (Kaufman & Rooy, 2004):

- Os principais elementos de liga definem as gamas de elementos que controlam a aptidão para fundição e o desenvolvimento das suas propriedades.
- Elementos de liga menores controlam o comportamento de solidificação, modificam a estrutura eutética, refinam as fases primárias, refinam o tamanho e a forma dos grãos, promovem ou suprimem a formação de fases e reduzem a oxidação.
- Os elementos de impureza influenciam a capacidade de moldação e a forma de fases insolúveis que por vezes limitam ou promovem as propriedades desejadas.

Embora se tenha desenvolvido um grande número de ligas de fundição de alumínio, existem sete famílias mais adequadas ao processo de fundição (Kaufman & Rooy, 2004):

- Alumínio-cobre (2 xxx)
- Alumínio-silício-cobre (3 xxx)
- Alumínio-silício (4 xxx)
- Alumínio-silicone-magnésio (6 xxx)
- Alumínio-magnésio (5 xxx)
- Alumínio-zinco-magnésio (7 xxx)
- Alumínio-titânio (8 xxx)

De acordo com esta designação, o primeiro dígito indica o grupo, de acordo com o elemento principal de liga; o segundo e terceiro dígitos identificam a liga dentro do respetivo grupo; o último dígito indica a forma do produto. Os sufixos relacionados com o tratamento térmico aplicado são idênticos aos atribuídos às ligas mecânicas (Branco, Ferreira, Costa, & Ribeiro, 2012).

As ligas de alumínio têm na sua designação sufixos, consoante os tratamentos térmicos aplicados (Kaufman & Rooy, 2004):

- F, sem tratamento
- O, recozimento
- T4, temperado com solução e envelhecido
- T5, temperado com precipitação
- T6, temperado com solução, revenido
- T7, temperado e envelhecido

Na maioria das peças automóveis produzidas em alumínio, são usadas duas ligas (Hirsch, 2011):

- As ligas AlMg (Mn) não-termicamente tratáveis ou endurecidas fisicamente (série 5000), mostrando uma boa combinação de resistência e aptidão para fundição.
- As ligas AlMgSi termicamente tratáveis (série 6000)

A adição de magnésio a ligas de alumínio-silício (série 6000) resulta em muito boas características para fundição com excelentes propriedades após tratamento térmico. Estes tipos de ligas também apresentam elevada resistência à corrosão e mantém um baixo nível de expansão térmica, o que é favorável a aplicações para motores ou outros componentes sujeitos a calor e/ou fadiga térmica durante o seu ciclo de vida (Kaufman & Rooy, 2004).

As ligas AlZnMg termicamente tratáveis (ligas da série 7000) são utilizadas para aplicações especiais de alta resistência, mas a sua aptidão para fundição é fraca,

exigindo boas práticas de fundição para minimizar os defeitos do tipo fendas a quente (metal sob tensão térmica contrai e rompe) e fendas a frio (metal após solidificação não pode contrair e rompe).

As ligas 6000, são robustas, fáceis de manusear, compatíveis com soldadura (Hirsch, 2011), e ideais para fundição.

Devido às propriedades apelativas anteriormente referidas, neste trabalho será utilizada uma liga de alumínio-silício-magnésio, cuja composição e propriedades mecânicas se apresentam nas tabelas 1 e 2 respetivamente. A composição química da liga foi averiguada por espectroscopia de emissão ótica (OES – optical emission spectroscopy) por Alexandre Velhinho no âmbito do seu trabalho de Doutoramento (ver tabela 1) (Velhinho, 2003).

Tabela 1 - Composição química, em %, da liga AlSi7Mg, segundo a análise realizada por Alexandre Velhinho. (Velhinho, 2003)

Elementos	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	V
Teores [wt %]	92,72 (± 0,16)	6,69 (± 0,16)	0,12 (± 4,63 x 10 ⁻³)	0,01 (± 1,24 x 10 ⁻¹⁰)	0,33 (± 0,01)	0,109 (± 0,005)	0,0028 (± 0,0001)

Tabela 2 - Propriedades mecânicas da liga AlSi7Mg (Anexo A).

Processo		Moldação em areia		
		Sem tratamento F	Parcialmente envelhecido T64	Endurecido e envelhecido T6
Tensão de cedência	MPa (EN 1076)			230
	N/mm ²	140 - 220	200 - 270	240 - 320
Tensão limite de elasticidade	MPa (EN 1076)			190
	N/mm ²	80 - 140	120 - 170	220 - 280
Extensão	% (EN 1076)			2
	%	2 - 6	4 - 10	3 - 6
Dureza de Brinell	HBW (EN 1076)			75
	HB	45 - 60	60 - 80	80 - 110

As propriedades físicas e as características técnicas da liga AlSi7Mg são apresentadas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Propriedades físicas da liga AlSi7Mg (valores indicativos sujeitos às normas UNI EN e ex DIN), Anexo A.

Densidade	2.66 Kg/dm ³
Ponto de fusão	625 °C
Calor específico (a 100°C)	0.92 J/Gk
Contração linear em areia	1.1 - 1.2 %
Condutividade elétrica	21 - 27 MS/m
Módulo de elasticidade	7400 m/mm ²
Condutividade térmica a 20°C	160 - 180 W/(m K)
Temperatura máxima sugerida	780 °C

Tabela 4 - Características técnicas, indicações qualitativas (Anexo A).

Resistência a elevadas temperaturas (até 200°C)	Baixa
Resistência geral à corrosão	Boa
Maquinabilidade	Boa
Aptidão para fundição	Boa

Outras indicações sobre o uso desta liga podem ser encontradas no anexo A.

Como se verá mais à frente, o valor da dureza de Vickers da liga será fundamental para o cálculo da previsão de vida das peças vazadas. Singh et Al. (Singh, Telang, & Das, 2016) realizaram ensaios de dureza de Vickers a esta liga, com e sem tratamento térmico, tendo obtido um valor médio para a liga sem tratamento térmico de 57,44 HV. Uma vez que existem pequenas variações nas propriedades das ligas de alumínio consoante o fabricante, neste trabalho foram realizados ensaios de dureza a cada amostra (ver capítulo 4), tomando-se o valor 57,44HV como referência.

Outro dado importante, na previsão durabilidade das peças, é o número de ciclos até à rotura obtido nos ensaios de fadiga (curva S-N do material). Tajiri et Al. (Tajiri, Nozaki, Uematsu, & Kakiuchi, 2014) estudaram a previsão do limite de fadiga de um componente de grandes dimensões fabricado por fundição da liga de alumínio AlSi7Mg. Este assunto é abordado com mais pormenor no sub-capítulo 2.2.3. Na figura 4 apresenta-se a curva S-N resultante do seu estudo. Esta curva foi usada na análise de resultados que consta no capítulo 5 desta tese.

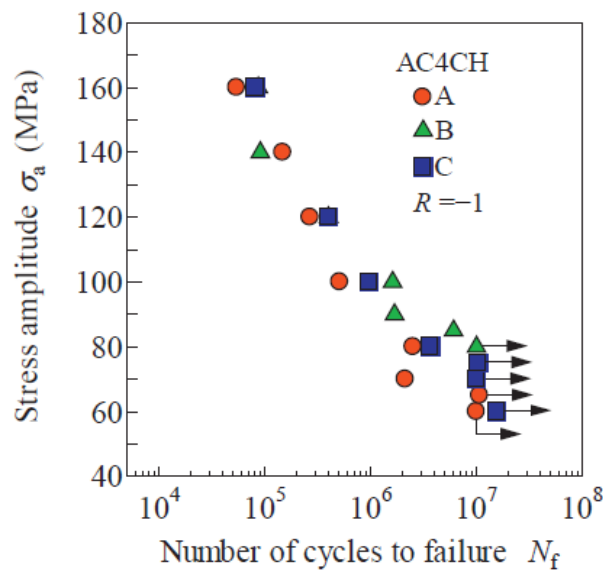


Figura 4 - Curva S-N da liga AlSi7Mg (Tajiri et al., 2014).

2.2 Fundição de alumínio

2.2.1 Introdução histórica

Acredita-se que o processo de fundição de metal seja utilizado há mais de 5500 anos, quando cavidades moldadas eram esculpidas ou impregnadas em moldes de minerais e argilas macias. O cobre, a prata e o ouro eram então derretidos e solidificados nessas cavidades. Mais tarde, latão, bronze, estanho e zinco foram usados para produzir artefactos, armas e ferramentas. À medida que a fundição de metal se desenvolveu, surgiram formas mais complexas de misturas de areia e argila. Os mesmos métodos foram duplicados posteriormente para outros metais, incluindo ferro e aço, no século XVII (Kaufman & Rooy, 2004).

O custo do alumínio diminuiu gradualmente e, no final do século XIX, as aplicações importantes de engenharia tornaram-se economicamente viáveis. Na altura, três mercados emergentes beneficiaram do novo material (Kaufman & Rooy, 2004): Eletrificação; Indústria automóvel; Indústrias aeronáutica e aeroespacial. As peças obtidas por fundição de ligas de alumínio começaram então a ser produzidas comercialmente usando processos já em uso para outros metais. As atrativas propriedades do alumínio para a engenharia levaram rapidamente à adoção de processos de fundição existentes e a desenvolvimentos que alteraram o modo como os diversos formatos de peças de engenharia podem ser produzidos a partir de metal fundido. Um grande esforço para empregar moldes de ferro e aço na fundição de

alumínio resultou em operações comerciais de 'moldes permanentes na primeira década do século XX.

O alumínio pode ser vazado essencialmente por todos os processos existentes, sendo os mais utilizados a fundição por moldação em areia e fundição sob pressão (Kaufman & Rooy, 2004).

2.2.2 Interesse do processo

Como já foi referido, devido às suas propriedades mecânicas, o alumínio é um material muito atrativo para indústrias como a aeroespacial e a automóvel, bem como para instalações elétricas. Embora tenha propriedades mecânicas com valores menores aos do aço, o alumínio tem uma relação resistência/peso elevada e boas propriedades de corrosão, além de ser um material leve (Linder, Axelsson, & Nilsson, 2006). Nas indústrias automóvel e aeroespacial, o peso das peças é um fator chave, uma vez que está diretamente ligado ao consumo de combustível e, conseqüentemente, às emissões de CO₂. Assim, a substituição do aço por alumínio apresenta-se como a medida mais eficaz para reduzir as emissões de CO₂ e, ao mesmo tempo, manter o desempenho, a qualidade da condução e, acima de tudo, a segurança (Hirsch, 2011).

O maior volume de componentes de alumínio nos carros são peças fabricadas por fundição, como blocos de motores, cabeças de cilindros, rodas e peças especiais do chassi. As peças criadas por fundição de alumínio também têm vindo a ganhar aceitação na construção de quadros espaciais, peças de eixo e componentes estruturais. O progresso significativo no desenvolvimento de ligas de alumínio, bem como no processo de controlo e métodos de fundição, melhorou as propriedades dos materiais e a sua integração funcional, permitindo ao alumínio atingir os elevados requisitos específicos das indústrias mecânicas (Hirsch, 2011).

Uma indústria que tem vindo a utilizar o alumínio como um dos constituintes dos seus produtos é a indústria das próteses. Esta área incentivou a pesquisa de novas ligas metálicas com boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Embora o titânio seja o seu material de escolha, o alumínio aparece como segundo constituinte de várias das ligas desenvolvidas, como o Ti6Al4V. As próteses referidas são fabricadas por fundição de cera perdida, também conhecida por fundição de investimento ou precisão, por exigir um acabamento dimensional bastante bom e baixa rugosidade superficial (Félix, 2008). No entanto, a tendência deverá ser para a diminuição do uso do alumínio nesta área, uma vez que existem problemas relativamente à sua compatibilidade com o tecido orgânico.

Como se pode ver, a moldação em areia no fabrico de peças de alumínio é utilizada há várias décadas e continua em crescimento, já que o processo permite a produção de formas complexas numa gama ampla de tamanhos e a um custo relativamente baixo. O uso de alumínio em automóveis e veículos comerciais está em crescimento uma vez que oferece a maneira mais rápida, segura, favorável ao meio ambiente e económica de aumentar o desempenho, a economia de combustível e reduzir as emissões, mantendo ou melhorando a segurança e a durabilidade. Tanto em veículos de gama média como o Ford F-150 como para carros de luxo como Audi, Mercedes Benz e Land Rover, o alumínio é cada vez mais o material de eleição para os fabricantes, graças à sua resistência e vantagens ambientais (The Aluminum Association, 2017b). Também o avanço da tecnologia de aeronaves e veículos espaciais está diretamente ligado ao desenvolvimento e produção de ligas de alumínio. Do uso do alumínio pelos irmãos Wright no motor do seu primeiro biplano ao uso da NASA de uma liga de alumínio e lítio na sua nave espacial Orion, o alumínio cria o potencial para o desenvolvimento dos transportes, quer terrenos quer espaciais (The Aluminum Association, 2017a). Também na área militar o alumínio é o metal mais escolhido nas diferentes aplicações, desde armaduras e veículos e munições.

2.2.3 Métodos de previsão de vida

Os defeitos de fundição, como a porosidade e defeitos resultantes da contração do metal, ocorrem geralmente durante o processo de vazamento. Estes defeitos afetam a iniciação de fissuras de fadiga e dominam fortemente a resistência à fadiga. Particularmente em componentes de grande dimensão, o fluxo de metal fundido é mais difícil e, uma vez que a taxa de arrefecimento depende da zona da peça, existe maior probabilidade de formação de defeitos de fundição.

Murakami et al. (Murakami et al., 1989) sugeriu um método analítico para prever o limite de fadiga do aço usando as estatísticas de valor extremo do tamanho de defeito. Ueno et al. (Ueno, Nishida, Miyakawa, Yamada, & Kikuchi, 2014) modificaram a equação de Murakami e propuseram as equações 1 e 2 para prever o limite de fadiga de uma liga de alumínio vazado (A356) com base no tamanho dos defeitos. Ou seja através da observação das várias secções transversais, os autores estimam o tamanho máximo de defeito, \sqrt{area} , que substituem nas equações 2.1 e 2.2 para prever o limite de fadiga, σ_w .

$$\sigma_w = \frac{1.43(75 + HV)}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \text{ se } \sqrt{area} < 1400\mu m \quad (2.1)$$

$$\sigma_w = \frac{1.43(450 + HV)}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{3}}} \text{ se } \sqrt{area} > 1400\mu m \quad (2.2)$$

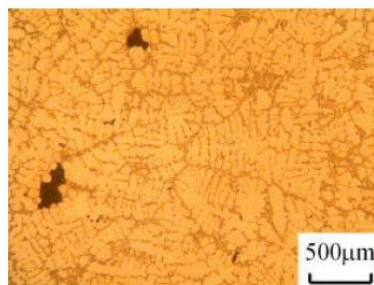
Onde:

σ_w – tensão limite de fadiga

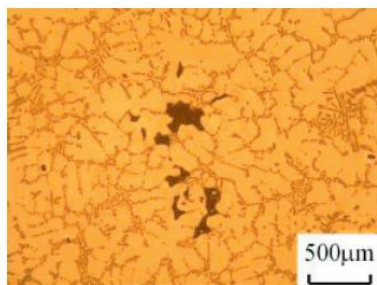
HV – dureza de Vickers

\sqrt{area} – tamanho máximo de defeito estimado por estatísticas de valor extremo

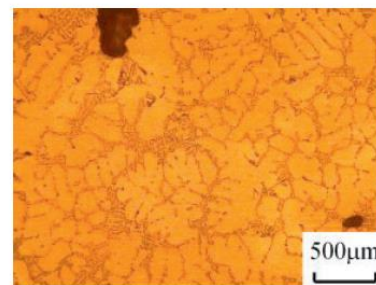
Tajiri et al. (Tajiri et al., 2014) realizaram ensaios de fadiga de flexão rotativa à liga de alumínio fundido AlSi7Mg (A356) utilizando amostras de três locais, de um componente de grande dimensão, onde as taxas de arrefecimento variavam. Para o efeito, foi fundido um lingote de grande dimensão e vazado na forma da peça pretendida. Após a solidificação da peça, foram retiradas três amostras, de três zonas diferentes (ver Figura 5), uma distante do gito de vazamento (A) e duas perto deste (B e C). Estas amostras foram polidas e então inspecionadas utilizando um microscópio ótico, de modo a observar-se a sua microestrutura e possíveis defeitos (Figura 5). A estrutura dendrítica mostrou-se amplamente distribuída, com o espaçamento dos braços dendríticos a aumentar com a diminuição da taxa de arrefecimento. Foram também observados defeitos de fundição, com tamanhos variados e dispersos numa ampla gama.



(a) Material A



(b) Material B



(c) Material C

Figura 5 - Microestrutura das diferentes amostras do estudo de Tajiri, com uma taxa de arrefecimento decrescente, de A para C (Tajiri et al., 2014).

Tajiri et al. (Tajiri et al., 2014), realizaram um teste de dureza de Vickers sob uma carga de 0,98 N e um tempo de espera de 30 s, e também um teste de tração de modo a verificar as tensões máxima e mínima do material. Efetuaram também ensaios de fadiga numa máquina de teste de fadiga de flexão rotativa de quatro pontos com $R = -1$ e uma frequência de 60 Hz, à temperatura ambiente. Foi traçada a curva S-N e obtida a tensão limite de fadiga σ_w para um número de ciclos $N = 10^7$. Terminados os ensaios, as superfícies de fratura foram examinadas em detalhe num microscópio eletrónico de varrimento (SEM). Verificou-se que em todas as amostras as fissuras de fadiga se iniciaram a partir de defeitos de fundição localizados perto da superfície. Os autores utilizaram então o método analítico proposto por Ueno et al. (equações (2.1) e (2.2)) para estimar a tensão limite de fadiga, σ_w , das peças que analisaram. Concluíram que as previsões estavam de acordo com os resultados experimentais, mas os valores diferiam ligeiramente, concluindo que outros fatores metalúrgicos afetam a resistência à fadiga.

3. Laboratório de Fundição do DEMI

3.1 Construção do laboratório

Em 2012, João Russo (Russo, 2012) instalou com sucesso dois fornos, um para fundição e outro para processos de tratamento térmico, no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI - FCTUNL, como parte de sua tese de mestrado. Na altura, garantiu o controlo de ambos os fornos, e construiu um layout para a sua operação. No entanto, devido a limitações de tempo e de espaço existentes na altura não foi criado um laboratório de fundição tendo em conta a Higiene e Segurança no Trabalho. Um dos objetivos desta dissertação é a criação do laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A autora deparou-se, nas instalações do laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI, com uma estrutura metálica onde se posicionavam os dois fornos, como mostra a figura 6.



Figura 6 - Fotos do layout existente aquando do início deste trabalho a) vista de frente, b) vista lateral.

A autora, para efetuar o levantamento das necessidades e criar o novo layout, começou por fazer o desenho da estrutura encontrada, em *SolidWorks*, como mostra a figura 7.

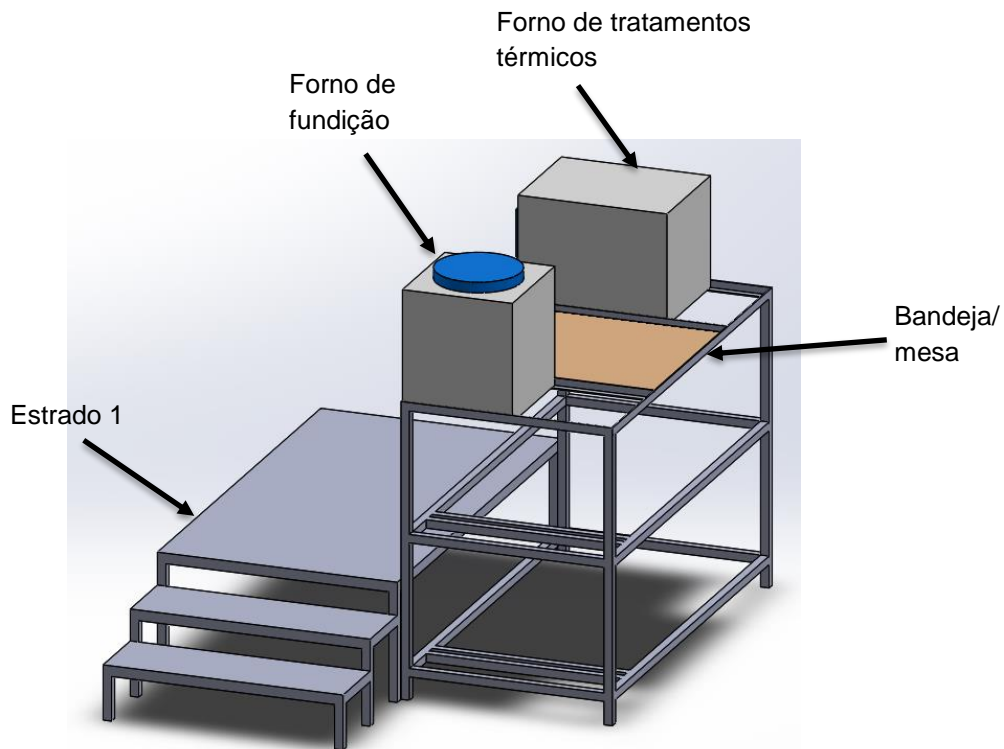


Figura 7 - Layout existente no Laboratório de Fundição e Soldadura do DEMI, desenhado em *SolidWorks*.

A autora começou por estudar o funcionamento/controlo dos dois fornos instalados, do processo de fundição por moldação em areia e com esse conhecimento estudou as condições de Higiene e Segurança mínimas a impor a um Laboratório de Fundição. Para tal iniciou o projeto de uma estrutura metálica para que o processo de fundição, tendo em conta, sempre, dois postos de trabalho, fosse realizado em Segurança.

A autora chegou à conclusão que, para que os dois fornos possam ser utilizados em segurança, dever-se-á ter em conta o seguinte:

- A altura da plataforma (estrado 1 na figura 7) deve ser aumentada de modo a permitir uma boa postura dos operadores/investigadores e, conseqüentemente, permitir que o processo de vazamento do metal fundido seja realizado em segurança;
- Uma plataforma com a mesma altura deve ser instalada no lado oposto, pois podem ser necessárias duas pessoas tanto no processo de moldação como no de vazamento (ver figura 8);
- A altura da bandeja/mesa (ver figura 7) também deve ser aumentada, de modo a diminuir a distância entre a saída do forno e o gito de vazamento, minimizando o desenvolvimento de filmes de óxido durante o vazamento e o esforço dos operadores/investigadores;
- Os degraus das escadas devem ser reconstruídos de acordo com as normas existentes (Teles, Pereira, & Ribeiro, n.d.);

- Para uma maior segurança dos operadores/investigadores deve ser instalada uma chaminé de escoamento de gases;
- Deverá ser instalado um armário para os moldes, modelos, cadinhos, ferramentas, consumíveis e Equipamento de Proteção Individual (EPI).

Da análise mais pormenorizada do desenho mostrado na figura 7, verificou-se que a altura do patamar de trabalho não era suficiente para um trabalho em segurança, sendo de apenas 565 mm, ficando o operador/investigador muito baixo relativamente à saída do forno de fundição e à bandeja de areia. Decidiu-se então aumentar essa altura para 850 mm (estrado 2 na figura 8).

Relativamente ao dimensionamento dos degraus de acesso ao patamar, este deve seguir algumas indicações que constam do Guia Acessibilidades-DL_163-06_8Ago (Teles et al., n.d.). Segundo o guia referido, as escadas devem ter uma profundidade (cobertor) não inferior a 280 mm e uma altura (espelho) não superior a 180 mm, sendo que estas dimensões devem ser constantes ao longo de cada lanço. Dadas as dimensões pretendidas, as escadas do novo layout ficam com 280 mm de cobertor e 170 mm de espelho, sendo necessários 4 degraus até ao patamar. Uma vez que o desnível a vencer é superior a 400 mm, devem existir corrimãos em ambos os lados das escadas, onde não existir apoio, como se mostra na figura 8. Estes devem ter uma altura compreendida entre 850 mm e 900 mm (Teles et al., n.d.).

Para melhorar as condições do trabalho de fundição, o estrado 2 (ver Figura 8) foi subido 285 mm. No entanto, quer para o trabalho com o forno de tratamentos térmicos, quer para a programação nos controladores, é necessária uma menor altura de patamar. Assim, decidiu-se criar um desnível nessa zona, de cerca de 200 mm. Desta forma, o utilizador pode operar ambos os fornos numa posição confortável e em segurança.

Caso seja necessário apoio no processo de vazamento, convém existir uma plataforma do lado oposto à mesa de moldação e vazamento (estrado 3 na Figura 8). Esta plataforma deve ter a mesma altura que a primeira, de modo que ambos os operadores/investigadores estejam à mesma altura, facilitando a coordenação de movimentos; e um comprimento que abranja o forno de fundição e a mesa de moldação e vazamento é suficiente.

Uma vez que se aumentou a altura da plataforma, a altura da bandeja de areia também deve ser aumentada (bandeja/mesa na figura 8), tanto para melhorar a postura do operador/investigador como para diminuir a distância entre a saída do forno e o topo da moldação, minimizando o desenvolvimento de filmes de óxido durante o vazamento. Deve ser tido em atenção que a altura entre a saída do forno e a mesa deve ser superior

a duas vezes a altura da caixa de moldação produzida e utilizada no âmbito deste trabalho ($2h = 2 * 80 = 160 \text{ mm}$), ver Figura 9.

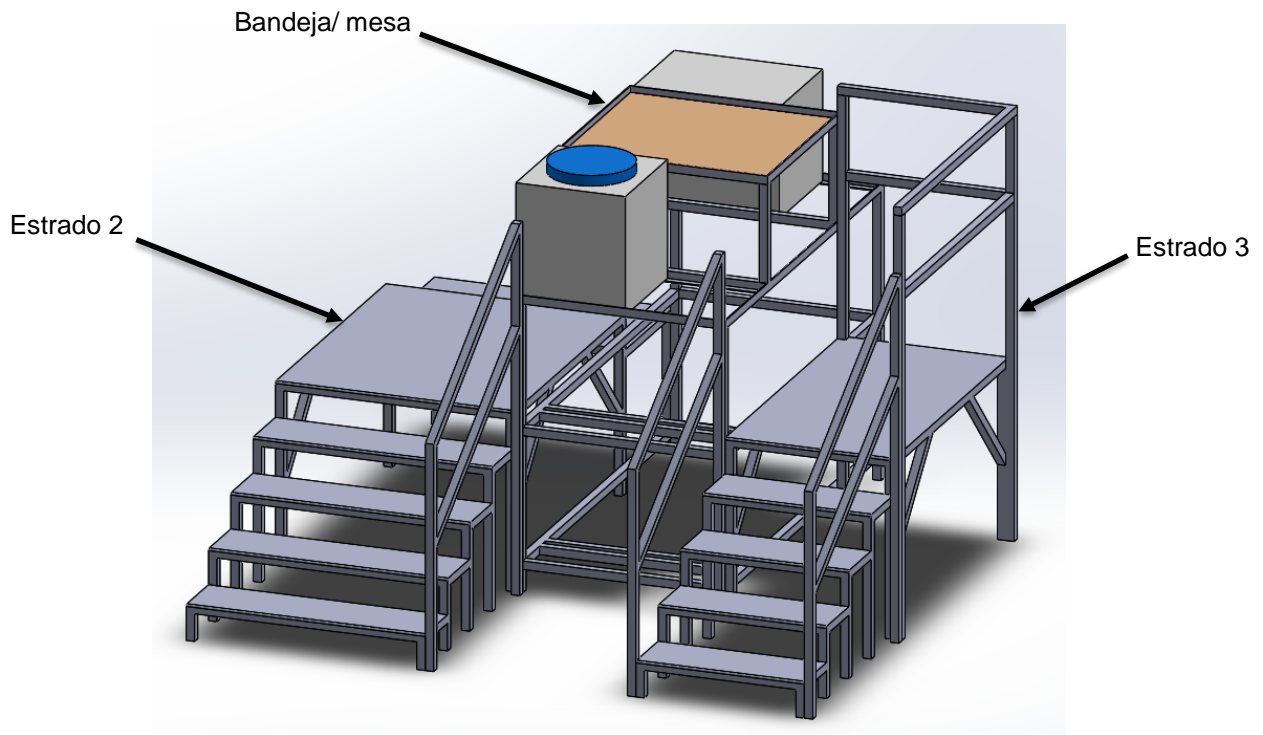


Figura 8 - Projeto do layout tendo em conta questões de Segurança e Higiene no Trabalho.

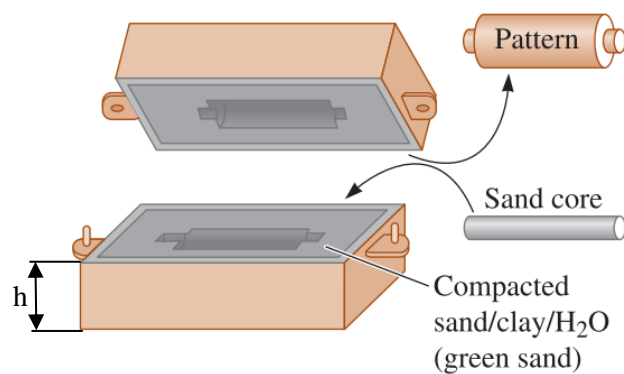


Figura 9 - Exemplificação de uma caixa de moldação, identificando-se a altura h (Askeland & Fulay, 2009).

Os desenhos técnicos referentes a este projeto encontram-se no anexo C. A figura 10 mostra o layout final do Laboratório de Fundição criado.



a)



b)




Figura 10 - Foto da estrutura de suporte dos fornos. a) Vista geral. b) Plataforma principal de trabalho.




3.2 Segurança no trabalho

O equipamento de proteção individual (EPI) é um fator chave quer na segurança do operador quer na precisão do trabalho a efetuar. Segundo o Manual de Segurança e Saúde no Trabalho para a Indústria da Fundição disponibilizado pelo ISQ, em 2014, e confirmado no Seminário 'Exposição ocupacional a agentes químicos - Meios de Proteção Individual', realizado no passado dia 8 de maio de 2017 no IPQ, a escolha do EPI e das respetivas indicações é atualmente adaptada a cada caso de trabalho, não existindo uma norma geral para a indústria da fundição. Por exemplo, a dimensão do trabalho de fundição a efetuar no laboratório do DEMI não é comparável à dimensão do trabalho efetuado numa grande empresa de fundição e, da mesma forma, os riscos associados e os cuidados a ter são diferentes.

Com base no manual de segurança referido, foram analisados os riscos inerentes ao trabalho no laboratório, e escolhido o EPI a ele mais adequado. Na tabela 5 apresentam-se os riscos e respetivo EPI selecionado pela autora, após consulta de várias empresas fornecedoras. A empresa que apresentou a relação preço/prazo de entrega mais competitiva foi a Sintimex. No anexo D é apresentado o EPI que deverá ser adquirido pelo DEMI para o Laboratório (sempre a contar com pelo menos dois operadores/investigadores).

Tabela 5 - Seleção do EPI consoante o risco analisado.

Risco: Queda EPI: capacete Peltor G3000C - com ventilação, leve, e encaixe para a adaptação de protetores auditivos ou viseira.	
Risco: Salpicos de metal fundido EPI: viseira Fonderman – frente robusta, resistente á corrosão e ao calor extremo, de fácil utilização, com adaptação a capacete universal.	
Risco: fumos do metal fundido, que contém partículas nefastas para as vias respiratórias EPI: Máscara de Partículas (Willson/Sperian) FFP1 4110 – utilização simples, recomendada contra poeiras de metais não ferrosos, incluindo alumínio.	

<p>Risco: salpicos ou derrame de metal fundido</p> <p>EPI: Bata Kevlar-Aramida Aluminizada 13K (Fecho Welcro) – fácil utilização</p>	
<p>Risco: salpicos ou derrame de metal fundido</p> <p>EPI: Luva 5 Dedos 03K - 38cm. Fibra Aramida Aluminizada - proteção contra riscos mecânicos, tais como abrasão, lâmina de corte, rasgo e perfuração e riscos térmicos tais como o contacto com pequenas chamas, calor por convecção, calor radiante, salpicos de metais fundidos.</p>	
<p>Risco: queda de material ou ferramentas de trabalho</p> <p>EPI: Botas Lemaitre Fusion Soude S3 – resistente a agressões externas mecânicas e térmicas (abrasão ou pingos de metal fundido).</p>	

O orçamento completo para este equipamento pode ser consultado no anexo D.

De modo a garantir que estas diretivas são cumpridas, deve existir sinalização apropriada na zona de trabalho, indicando tanto o equipamento a utilizar pelos operadores (Figura 12) e o tipo de risco inerente ao trabalho (Figura 11), como a zona interdita a pessoas externas ao trabalho. Uma vez que a sinalização de emergência e de incêndio já se encontra implementada, esta não é aqui referida. A sinalização apresentada foi consultada no catálogo da empresa Sinalux (Sinalux, 2017).

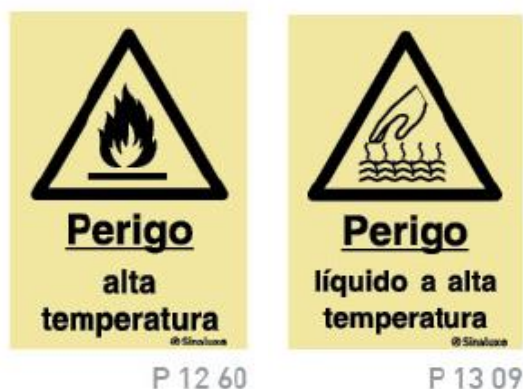


Figura 11 - Sinalização indicativa do risco inerente ao trabalho com os fornos.



Figura 12 - Sinalização indicativa do EPI a utilizar pelos operadores.

Na Figura 13 apresenta-se o sistema de escoamento de gases instalado atualmente no Laboratório de Fundição do CENIMAT, que utiliza o mesmo tipo de fornos instalado no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI, e, por esse motivo, será também o tipo de sistema indicado para este.



Figura 13 - Sistema de escoamento de gases instalado no laboratório de fundição do CENIMAT. a) Vista geral; b) Vista em pormenor.

3.3 Funcionamento dos fornos

Ambos os fornos existentes no Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEMI são elétricos e monofásicos, com uma potência de 12,2 kW. As câmaras destes equipamentos são cilíndricas, abertas nos topos, com diâmetro externo de 450 mm e interno de 205 mm, e um comprimento de 530 mm (ver Figura 14). São compostas apenas por material isolante, fibra cerâmica, composta essencialmente por alumina (Al_2O_3) e Sílica (SiO_2). No interior das câmaras encontram-se as resistências elétricas, como se pode observar na Figura 14.a). Estas são compostas por fio resistivo de 5 mm de diâmetro, de composição 22% Crómio (Cr), 5.8% Alumínio (Al) e Ferro (Fe), com capacidade para atingir temperaturas na ordem dos 1200 °C. De modo a estabelecer a ligação elétrica, ambas as câmaras estão providas de dois terminais. Estes, não são mais que duas chapas retangulares (50x20 mm) com um furo de 10 mm de diâmetro na extremidade, onde se fixam os terminais dos cabos provenientes do secundário do transformador. Ambas as câmaras possuem ainda uma tampa, de forma cilíndrica, com 50 mm de espessura, feita do mesmo material isolante, que assegura o isolamento de uma das extremidades do forno, como se pode observar na Figura 14.b) (Russo, 2012).

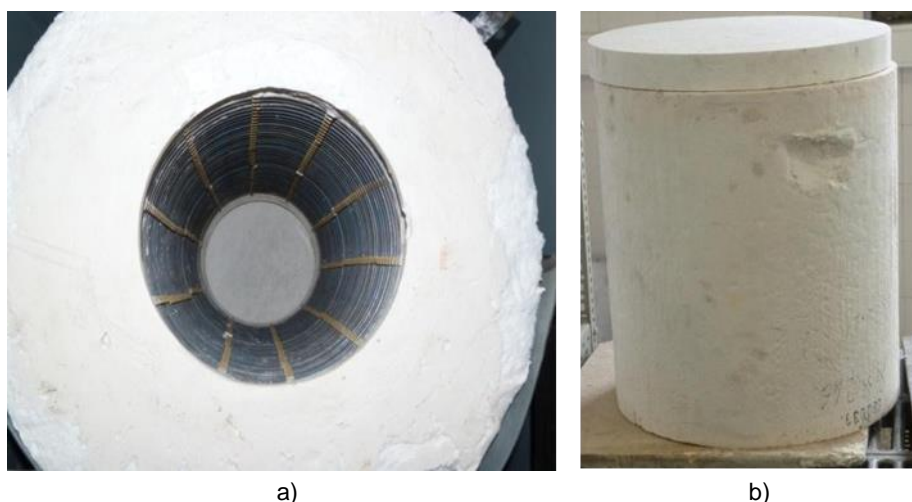


Figura 14 - a) Pormenor das resistências da câmara do forno b) Câmara do forno (Russo, 2012).

O controlo de temperatura do forno de fundição é feito por meio de um controlador programável PID (RKC REX P-96) (ver Figura 15.a), mais simples e menos preciso que o utilizado no forno de tratamentos térmicos (ver Figura 15.b), uma vez que o processo de fundição requer menor precisão. Este controlador recebe informação da temperatura através de um termopar (*input*) e envia uma resposta, em corrente contínua, de 4 a 20 mA, para dois relés de estado sólido montados em paralelo que funcionam como condicionadores de potência, controlando assim o primário do transformador e,

consequentemente, o secundário ligado aos terminais do forno. São utilizados termopares do tipo K, em fio Cromel-Alumel de 0,5 mm de diâmetro (Russo, 2012). Para a realização deste trabalho, foi necessário programar este controlador para uma rampa térmica lenta (aproximadamente 20 °/min) até se atingir os 625 °C (temperatura de fusão = 625 °C; $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$). As instruções utilizadas na programação encontram-se no Anexo E.



Figura 15 - a) controlador RKC REX P96; b) controlador RKC REX P300 (Russo, 2012).

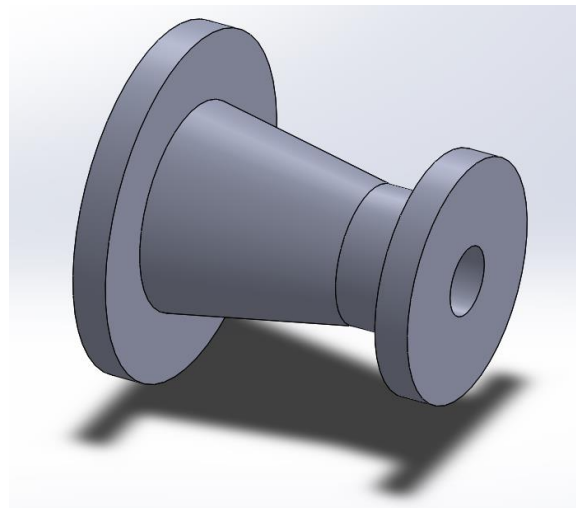
O Controlador RKC REX P96, teve uma avaria no decorrer desta tese pelo que se recorreu ao forno existente no CENIMAT FCT UNL (ver Figura 13), para proceder ao vazamento (ver subcapítulo 4.4).

4. Método experimental

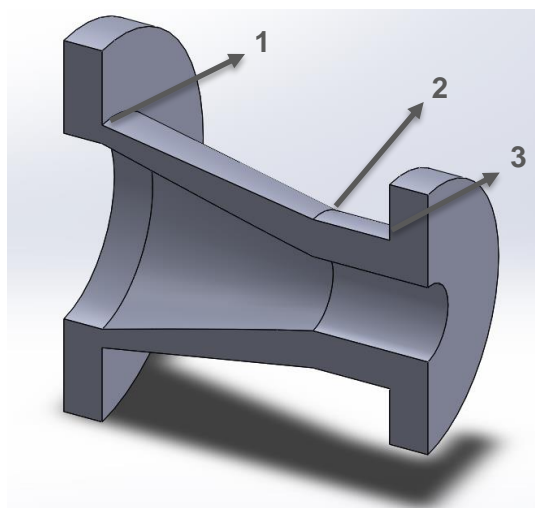
4.1 Escolha da peça para moldação em areia

No âmbito desta dissertação, foi escolhida uma peça com a geometria apresentada na Figura 16. Esta escolha teve como intuito o estudo de defeitos em zonas de descontinuidades geométricas acentuadas e, por cortesia da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, foi dispensado um *kit* para fundição por moldação em areia para o fabrico da mesma.

As três zonas de descontinuidade geométrica (zonas de concentração de tensões) referidas são identificadas na figura Figura 16.b).



a)



b)

Figura 16 - Peça modelo desenhada em *SolidWorks* a) inteira, b) em corte, identificando-se as descontinuidades geométricas.

Na Figura 17 estão apresentadas as dimensões de referência da peça que foi produzida.

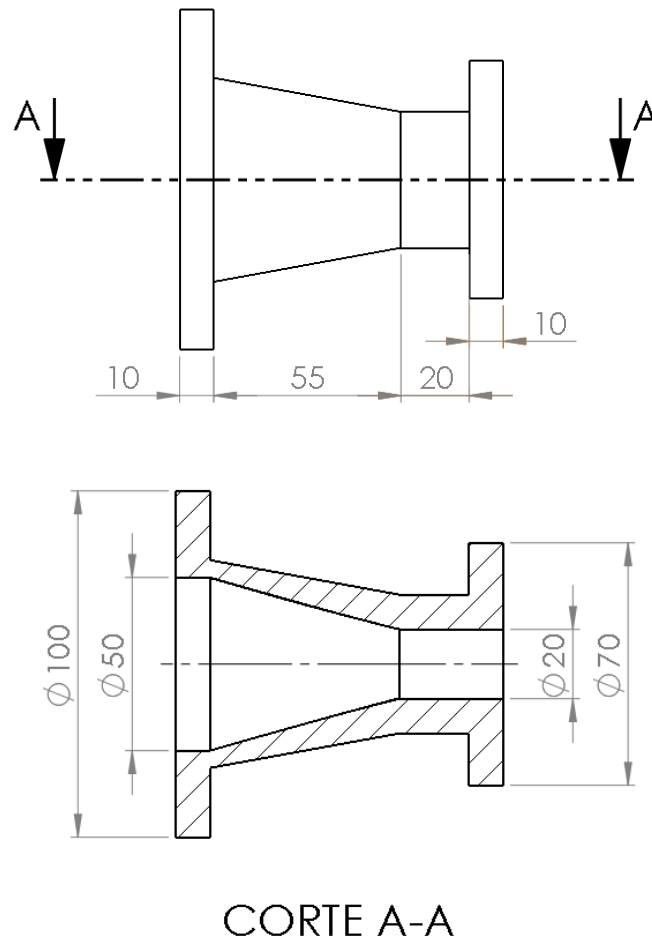


Figura 17 - Dimensões da peça modelo.

4.2 Dimensionamento do sistema de gitagem e alimentação

Para o cálculo do sistema de gitagem e alimentação da peça (Figura 18) a autora utilizou o Método dos Módulos (Ferreira, 2010). Este método consiste em recorrer aos volumes (V) e áreas de superfície (S) que serão obtidas através do *SolidWorks* para as zonas consideradas como críticas e aderentes. Após obtenção da razão V/S de cada uma das zonas e tendo em conta se as mesmas são consideradas placas ($L > 5e$) ou barras ($L < 5e$), sendo L o comprimento e e a espessura, consultou-se o respetivo ábaco de Gabel (Ferreira, 2010) para a obtenção da expressão que permitiu calcular o raio de ação dos alimentadores (R).

Identificaram-se os dois anéis da peça como as zonas críticas uma vez que era esperado que ali existisse uma maior concentração de tensões, e o resto da peça como

a zona aderente. Assim, optou-se por dois alimentadores, um em cada zona crítica, e um gito de vazamento situado ao centro da peça, como se mostra na Figura 18. Calcularam-se então os módulos para cada zona, recorrendo ao *SolidWorks* para os valores de V e S.

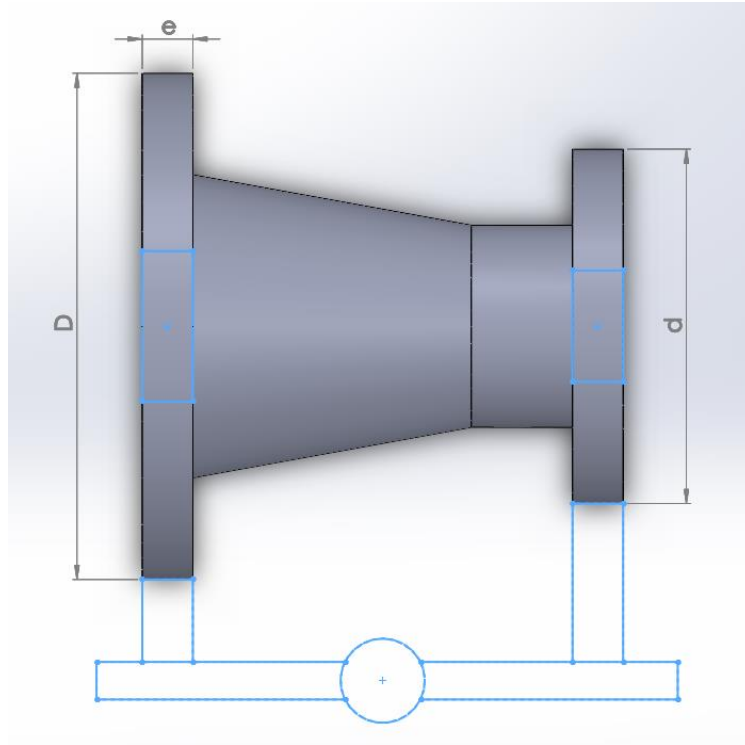


Figura 18 - Representação do sistema de giteamento e alimentação.

Depois de esquematizado o sistema de giteamento e alimentação, procedeu-se ao cálculo das dimensões de cada componente. Na tabela 6 apresentam-se as relações geométricas das zonas consideradas críticas.

Tabela 6 - Relações geométricas dos anéis da peça.

	D (cm)	d	L=D-d	e	V (cm ³)	S (cm ²)	M = V/S (mm)
Anel maior	10	5	5	1	58,90	164,90	3,6
Anel menor	7	2	5	1	35,34	98,96	3,6

Sendo que o módulo M apresentou o mesmo valor para os dois anéis, o raio de ação foi o mesmo para cada anel. Como $L = 5e$ em ambos os casos, e este valor se encontra no limite da definição de placa ou barra, teve que se avaliar que situação se ajustava melhor. Considerou-se barra, logo o raio de ação segundo Gabel é dado pela equação 4.1. (Ferreira, 2010) Na Figura 19 encontram-se representados os raios de ação calculados para cada alimentador.

$$R = 30\sqrt{M} = 30\sqrt{3,6} = 56,7 \text{ mm} \quad (4.1)$$

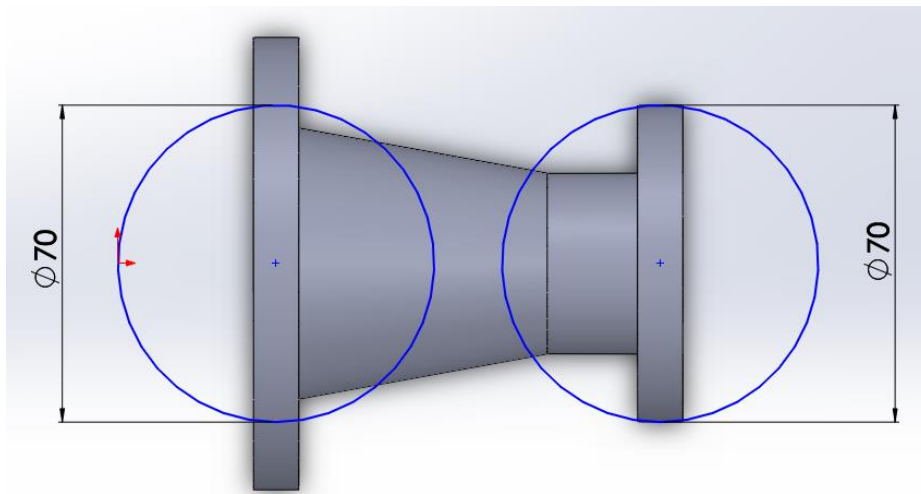


Figura 19 - Representação dos raios de atuação dos alimentadores, nas zonas críticas.

De seguida calcularam-se as dimensões dos alimentadores. Uma vez que o raio de atuação apresentou o mesmo valor nas duas zonas críticas, os alimentadores devem ter dimensões ou volume muito semelhantes. A relação D com a qual se trabalhou é dada pela equação 4.2. (Ferreira, 2010)

$$\begin{aligned} D &= 5kM \\ &= 6 * 3,6 = 21,6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Para o caso de um alimentador atmosférico prismático sugere-se a forma e dimensões apresentadas na Figura 20. No entanto, uma vez que não se trata de aplicação industrial, utilizaram-se neste trabalho dois alimentadores mais simples (do *kit*), como se mostra na Figura 21. O dimensionamento destes alimentadores teve em conta a forma sugerida para um alimentador atmosférico prismático, adaptando-a à geometria da peça e à altura da caixa de moldação.

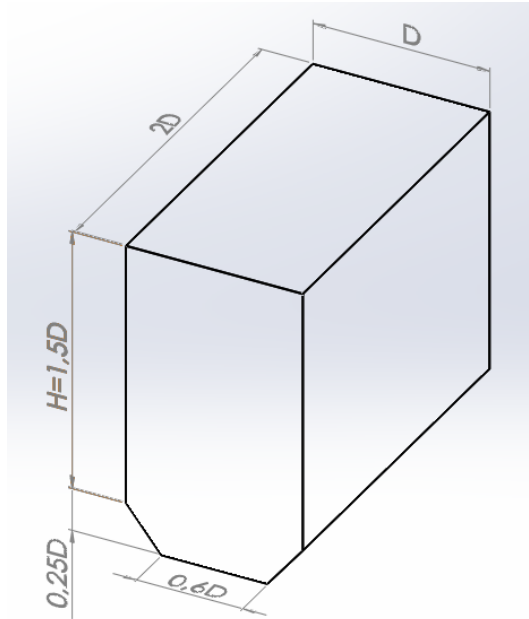


Figura 20 - Relações sugeridas pelo Método dos Módulos para o dimensionamento de um alimentador atmosférico prismático. (Ferreira, 2010)

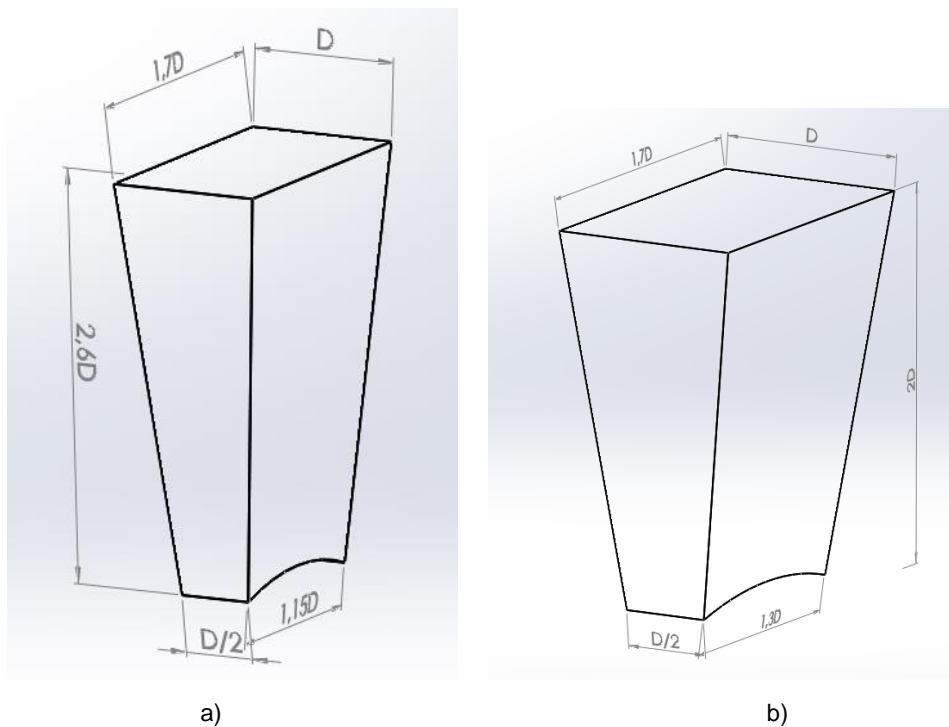


Figura 21 - Relações sugeridas para o dimensionamento do alimentador maior a) e do alimentador menor b), no caso específico deste trabalho.

Na tabela 7 apresentam-se os cálculos do peso da peça e dos alimentadores. Uma vez que inicialmente não se sabe o peso do sistema de gitação, fez-se primeiro um cálculo

aproximado da secção do gito de vazamento e respetivos canais de ataque e distribuição, utilizando apenas o peso da peça e dos alimentadores, já conhecidos.

Tabela 7 - Cálculo do peso da peça e dos alimentadores.

	Densidade (g/ cm ³)	V (cm ³)	Peso (g)
Peça (p)	2,66	167,37	445,20
Alimentador 1		26,64	131,06
Alimentador 2		22,63	
Peça + alimentadores (P)			576,26

Na tabela 8 apresentam-se as fórmulas das secções e respetivos cálculos de cada componente do sistema de gitagem proposto (ver Figura 23). Segundo José Ferreira (Ferreira, 2010), considera-se a constante $C=1,2$ no caso de ligas de alumínio. Para calcular o volume dos gitos, dos canais de ataque e de distribuição, utiliza-se o esboço do sistema de gitagem, de onde se obtêm a altura do gito e os comprimentos dos canais. A altura do gito é dada pela distância do topo dos alimentadores ao plano médio da peça (plano de apartação), por forma a ficar nivelado com o topo dos alimentadores. O comprimento dos canais é, por construção, igual ao comprimento da peça, ou seja, 9,5 cm. Sabendo o valor da secção do gito de descida, e se esta for circular tem-se então $d=1,17$ cm. No entanto, por uma questão de construção, optou-se por um gito de descida em forma cónica, ver Figura 22, com $D=29$ mm e $d=18$ mm.

Tabela 8 - Cálculo das secções dos vários componentes do sistema de gitagem proposto.

	S (cm ²)	h (cm)	l (cm)	V (cm ³)	P (g)
Gito (g)	$C\sqrt{P} = 0,91$	9,5		8,65	23
Canais de distribuição (c)	$\frac{1,2Sg}{2} = 0,55$		9,5	5,23	13,90
Canais de ataque	$\frac{2Sg}{2} = 0,91$				
p+a+g					599,26
Gito final (g)	$1,4\sqrt{P} = 1,08$				

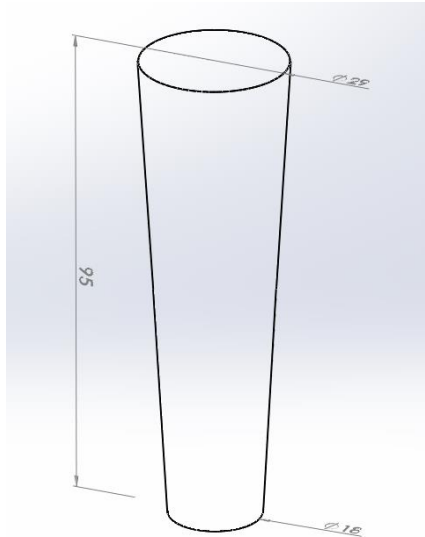


Figura 22 - Gito de vazamento utilizado.

Na Figura 23 pode ver-se o sistema de gitagem e alimentação utilizado com a respetiva peça, desenhado em SolidWorks.

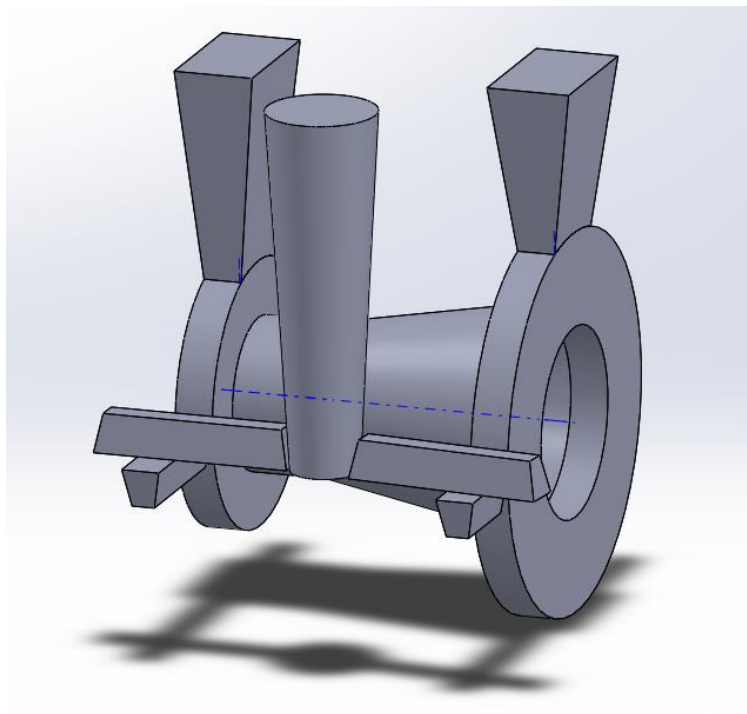


Figura 23 - Sistema de gitagem proposto.

4.3 Tempo de aquecimento e de solidificação

Tendo a caixa de moldação pronta a ser utilizada, foi necessário definir as rampas de aquecimento indicadas para a fundição da liga em questão. A primeira rampa de aquecimento não deveria ter um declive acentuado, uma vez que isso causaria um maior sobreaquecimento resultante da libertação do calor latente de fusão do material durante o processo. Como se pode ver no gráfico da Figura 24, no primeiro vazamento o forno foi programado para aquecer a cerca de 20 °C/min até atingir os 625 °C, notando-se uma subida rápida de temperatura associada à libertação do calor latente de fusão do metal. Programando-se um aquecimento mais lento do forno, este fenómeno pode ser atenuado, como se vê na Figura 25. Nos vazamentos B e C, o forno foi programado para aquecer mais lentamente, a cerca de 3,19 °C/min, primeiro até aos 600 °C, mantendo-se essa temperatura por 60 minutos, e depois até aos 625 °C, onde já quase não é visível um *overshoot* de temperatura.

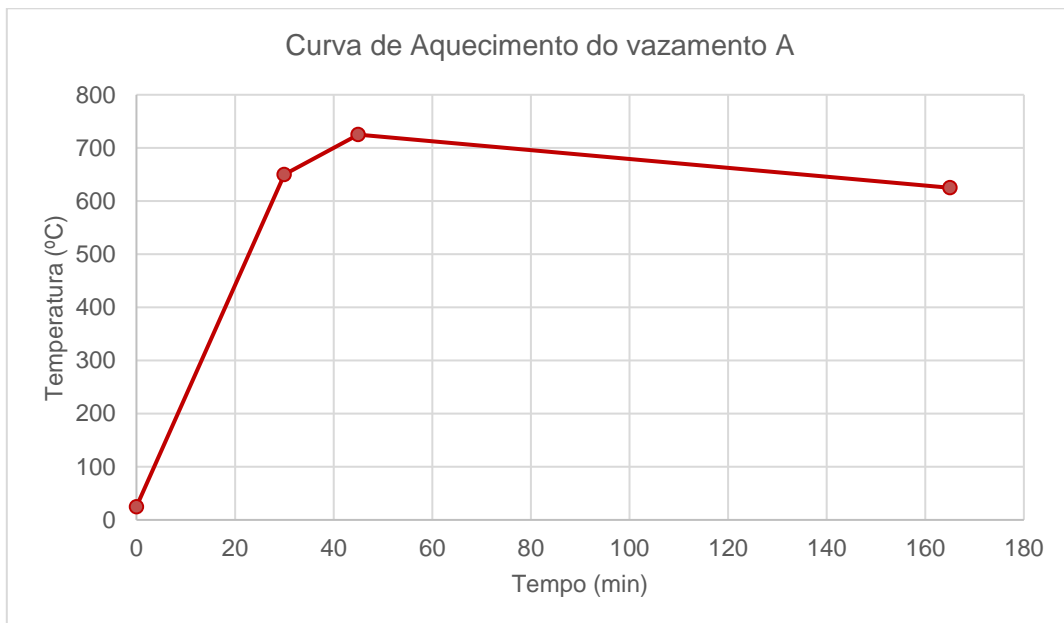


Figura 24 - Curva de aquecimento do vazamento A.

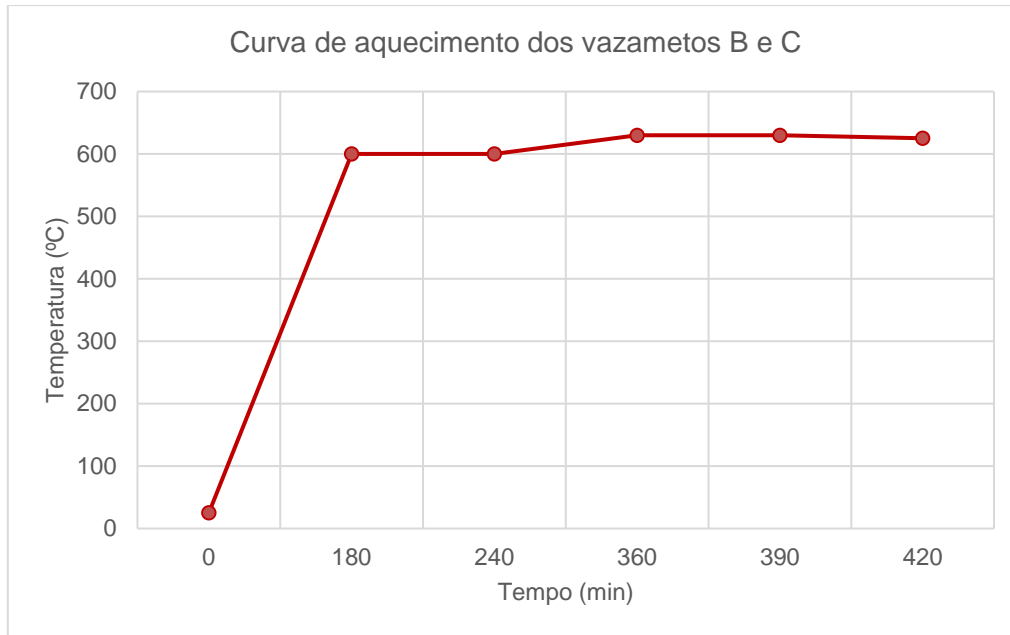


Figura 25 - Curva de aquecimento dos vazamentos B e C.

A taxa a que o crescimento do sólido ocorre depende da taxa de arrefecimento do processo. Uma taxa de arrefecimento mais elevada produz uma solidificação rápida, ou seja, tempos de solidificação baixos. O tempo necessário para a solidificação completa de uma peça relativamente simples pode ser calculado usando a regra de Chvorinov através da equação 4.3 (Askeland & Fulay, 2009):

$$t = B \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (4.3)$$

$$B = \left[\frac{\rho_m L}{T_m - T_o} \right]^2 \left[\frac{\pi}{4k\rho c} \right] \left[1 + \left(\frac{c_m \Delta T_s}{L} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

Onde:

T - temperatura de fusão do metal (K),

T_o - temperatura inicial do molde (K),

$\Delta T_s - T_{\text{vazamento}} - T_m = \text{sobreaquecimento (K)}$,

L - calor latente de fusão [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$],

k - condutividade térmica do molde [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ - densidade do molde [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

c - calor específico do molde [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ_m - densidade do metal [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

c_m - calor específico do metal [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Onde V é o volume da peça a fabricar e representa a quantidade de calor que deve ser removido antes da solidificação, A é a área de superfície do metal em contato com o molde e representa a superfície a partir da qual o calor é transferido, n é a constante de Chvorinov (geralmente cerca de 2), e B é a constante do molde. A constante do molde depende das propriedades e das temperaturas iniciais do metal e do molde. Esta regra tem em conta a geometria da peça e as condições de transferência de calor. A regra estabelece que, para as mesmas condições, uma peça com um volume pequeno e uma área de superfície relativamente maior arrefecerá mais rapidamente (Askeland & Fulay, 2009).

Uma vez que a peça a vaziar é relativamente pequena e o vazamento é feito imediatamente após o metal ser retirado do forno, não há necessidade de um sobreaquecimento. Segundo Chvorinov, nesta situação o tempo de solidificação é dado pela equação (4.5) (Tiryakioglu, Tiryakioglu, & Askeland, 1997):

$$t_{so} = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\rho_L L}{b_m (T_i - T_o)} \right]^2 \left(\frac{V}{A} \right)^m \quad (4.5)$$

ρ_L – densidade do metal: 2,66 g/cm³

L – calor latente de fusão: 389 kJ/Kg

b_m – difusividade térmica do molde *

T_i – temperatura na interface molde-metal: 625 °C

T_o – temperatura ambiente do molde: 25 °C

V – volume da peça a fundir: 271,19 cm³

A – área da superfície a partir da qual o calor é transferido: 695,23 cm²

m – constante, de valor 2 no trabalho de Chvorinov

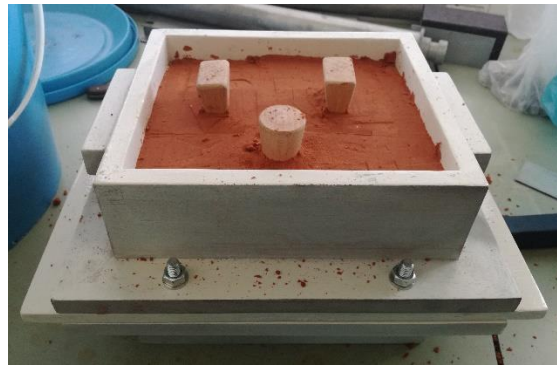
$$\begin{aligned} * b_m &= \sqrt{c_p * k * \rho} \\ &= \sqrt{1381 * 1,8 * 1746} \\ &= 2083,32 \text{ Jm}^{-2} \text{ k}^{-1} \text{ s}^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} t_{so} &= \frac{\pi}{4} \left[\frac{2660 * 389 * 10^3}{2083,32 * 600} \right]^2 * 0,152 \\ &= 81805,31 \text{ s} = 22 \text{ h } 43 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.7)$$

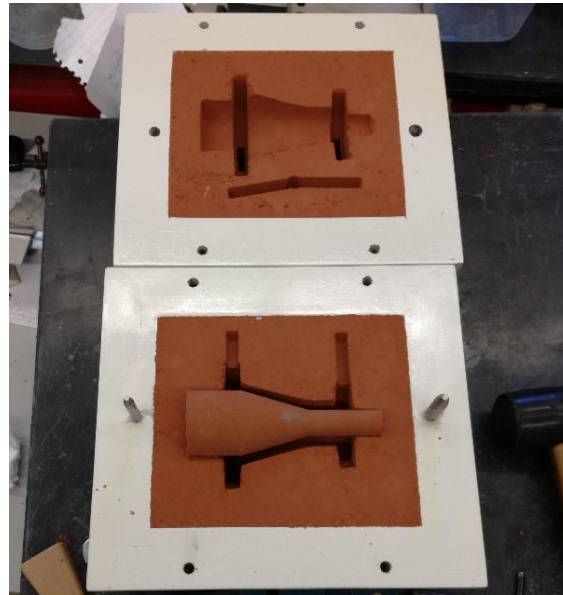
Era então esperado um tempo de solidificação de 22 horas e 43 minutos, sendo esta informação importante para se saber ao fim de quanto tempo se deve proceder à desmoldação.

4.4 Fabrico das peças e preparação das amostras

Para este estudo foram vazadas três peças, identificadas como A, B e C. O vazamento A foi realizado num dia, e os vazamentos B e C com cerca de uma semana de diferença. Nas Figura 26 e Figura 27 pode ver-se o processo de moldação e vazamento, respetivamente.

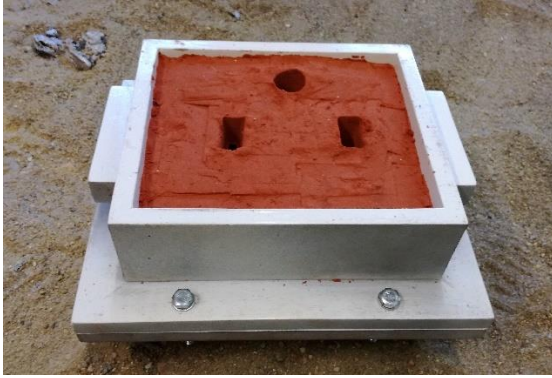


a)

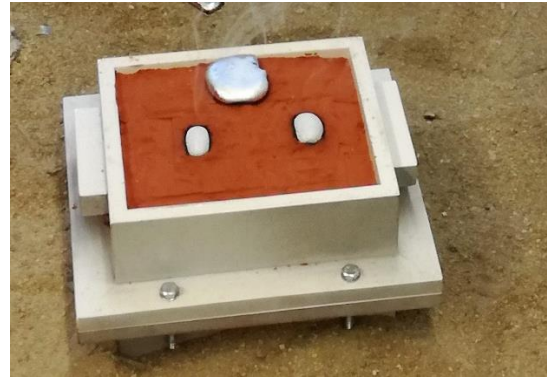


b)

Figura 26 - a) Caixa de moldação pronta a ser aberta, retirando-se primeiro os gitos; b) caixa de moldação aberta, já com o macho posicionado.



a)



b)

Figura 27 - a) Caixa de moldação fechada, pronta para o vazamento, já colocada na bandeja de areia; b) Caixa de moldação após o vazamento, visualizando-se que o metal já preencheu a cavidade do molde.

Após o vazamento, a caixa de moldação foi deixada a arrefecer durante cerca de 23 horas, respeitando o tempo de solidificação calculado anteriormente. Ao fim desse tempo, a caixa pôde ser aberta e procedeu-se então à desmoldação. Na Figura 28 apresenta-se uma das peças após a desmoldação.



Figura 28 - Peça ainda com o excesso de material do sistema de gitagem.

Uma vez feita a desmoldação, procedeu-se ao corte das partes do sistema gitagem. De seguida, cortou-se uma parte de cada peça como se mostra na Figura 29, de modo a estudar-se a diferença entre os três vazamentos. De cada parte cortada foram retiradas quatro amostras, identificadas na Figura 29 e Figura 30, de modo a comparar as diferentes zonas de concentração de tensões. Era esperada uma diminuição do número

e área dos defeitos na ordem 4, 1, 2, 3, uma vez que a concentração de tensões diminui ao longo da peça nessa ordem.

A identificação das amostras é feita do seguinte modo: a letra identifica o vazamento, o 1º número identifica a fatia, e o 2º número a amostra da fatia.



Figura 29 - Peça com os vários cortes realizados e identificação das zonas a estudar.

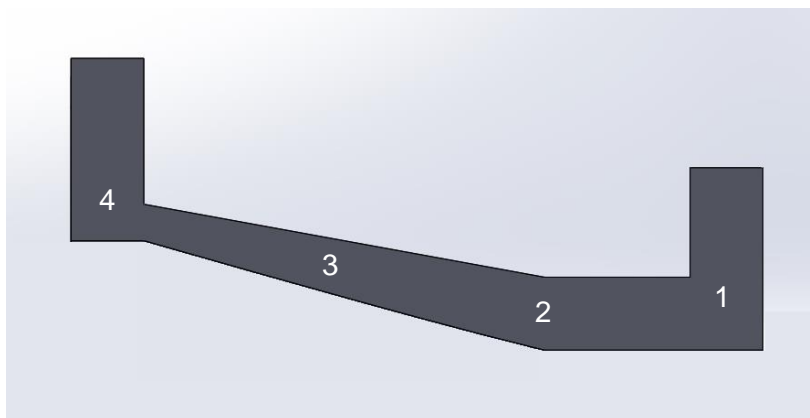
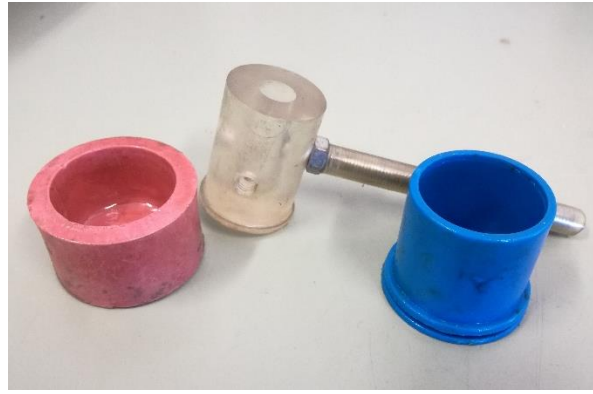


Figura 30 - Identificação das zonas da peça a estudar.

A etapa seguinte foi o polimento das amostras de modo a deixá-las prontas para a inspeção ao microscópio ótico. Para isso, foi necessário primeiro prepará-las, envolvendo cada amostra em resina, com a forma que se mostra na Figura 31.b), para que fosse possível o seu encaixe na máquina de polimento a utilizar. A preparação da resina consistiu em misturar a resina *Epoxy Resin 20-3430-064* com o endurecedor *Epoxy Hardener 20-3432-016* - Figura 31.a), utilizando-se uma medida pequena de endurecedor para a medida maior de resina, por cada copo (azul).



a)



b)

Figura 31 - a) Resina e endurecedor utilizados; b) Copos de medida e de forma.

Tendo as amostras já envoltas em resina, seguiu-se o polimento. Para este processo, utilizou-se a máquina *Buehler AutoMet 250*, que se pode ver na Figura 32.a) em funcionamento, adaptando os parâmetros consoante a lixa utilizada e o acabamento pretendido. Foram utilizadas várias lixas, começando numa das mais rugosas, P240, e prosseguindo até à mais fina, P2400. Na Figura 32 e Figura 33 pode ver-se este processo.



a)



b)

Figura 32 - a) Processo de polimento; b) Amostras posicionadas na máquina de polimento.

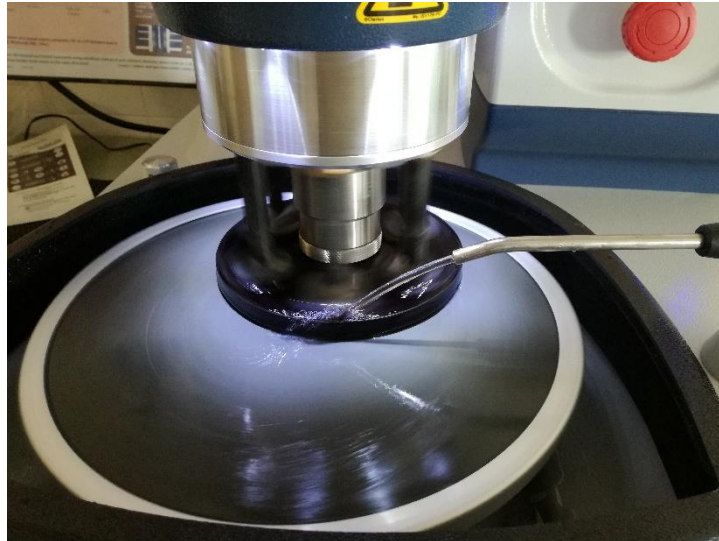


Figura 33 - Processo de polimento em pormenor.

Após o polimento com as lixas, seguiu-se a passagem pelos panos. Neste passo utilizou-se uma suspensão de alumina (*Micro polish II* de 1 μm), que se deitou sobre o pano antes do polimento.

Tendo as amostras prontas, realizaram-se então os ensaios de dureza de Vickers, seguindo-se a inspeção no microscópio ótico *Leica DMI5000 M* instalado no CENIMAT, onde se pôde observar a microestrutura do material e os defeitos resultantes do processo de fundição.

4.5 Ensaios

Uma vez que da ficha técnica da liga não consta o valor da dureza de Vickers e que este é crucial para o cálculo da previsão de vida das peças, foram efetuados ensaios de dureza de Vickers utilizando o microdurómetro *HM 100*. Foi realizado um teste por cada peça vazada, de modo a despistar algum erro, e no final, calculada a média dos resultados. Cada teste consistiu em 6 indentações, com uma força de 0,1 Kgf durante 10 segundos. Considerou-se uma distância entre indentações de 2,5 vezes a maior diagonal da primeira indentação, de acordo com a norma ASTM E384 – 16 (“ASTM E384-2016: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials,” 2016). O passo seguinte foi a contabilização de defeitos, em que foi primeiro efetuado um varrimento de todas as amostras utilizando o microscópio ótico do CENIMAT, *Leica DMI5000 M* (Figura 34). Verificando-se que as imagens obtidas se encontravam em condições de ser estudadas, seguiu-se a sua análise utilizando o programa *ImageJ*. Com este programa realizou-se um *threshold* de modo a limitar em dimensão os defeitos contabilizados pelo programa, de modo a serem visíveis apenas os defeitos do material, excluindo a microestrutura e o fundo das imagens, no caso de imagens que continham

bordas. Desta contabilização excluiu-se cerca de 0,5 mm a partir das bordas da peça que seriam maquinadas, e por isso não teriam influência na previsão de vida mais à frente calculada.



Figura 34 - Microscópio óptico de varrimento *Leica DMI5000 M*.

5. Apresentação e análise dos resultados

5.1. Resultados de dureza

Na tabela 9 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de dureza realizados às peças A, B e C, na zona com menor concentração de tensões, a zona 3 (Figuras 29 e 30).

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de dureza de Vickers às amostras A, B e C.

HV		
A	B	C
56,9	53,9	56,3
56,5	61,1	57,2
56,1	52,6	54,9
56,6	56,8	55,1
55,9	60,4	55,5
55,5	55	53,3

Tendo estes resultados, recorreu-se a um teste de normalidade para os validar, utilizando o programa *Minitab (versão trial)*. De modo a determinar se os dados seguiam uma distribuição normal (hipótese nula H_0), comparou-se o P-Value (probabilidade de significância) com o nível de significância α definido para o teste. Geralmente, um nível de significância de 0,05 funciona bem. Um nível de significância de 0,05 indica que o risco de concluir que os dados não seguem uma distribuição normal quando na verdade seguem é de 5%.

Se o P-value for inferior a α , conclui-se que os dados não seguem uma distribuição normal (rejeita-se a hipótese nula, H_0). Se o P-value for superior a α , conclui-se que os dados seguem uma distribuição normal (não se rejeita a hipótese nula, H_0).

Verificou-se que os resultados de cada teste seguiam uma distribuição normal com um Intervalo de Confiança de 95%, e obteve-se a média e o desvio padrão, como se mostra nas Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

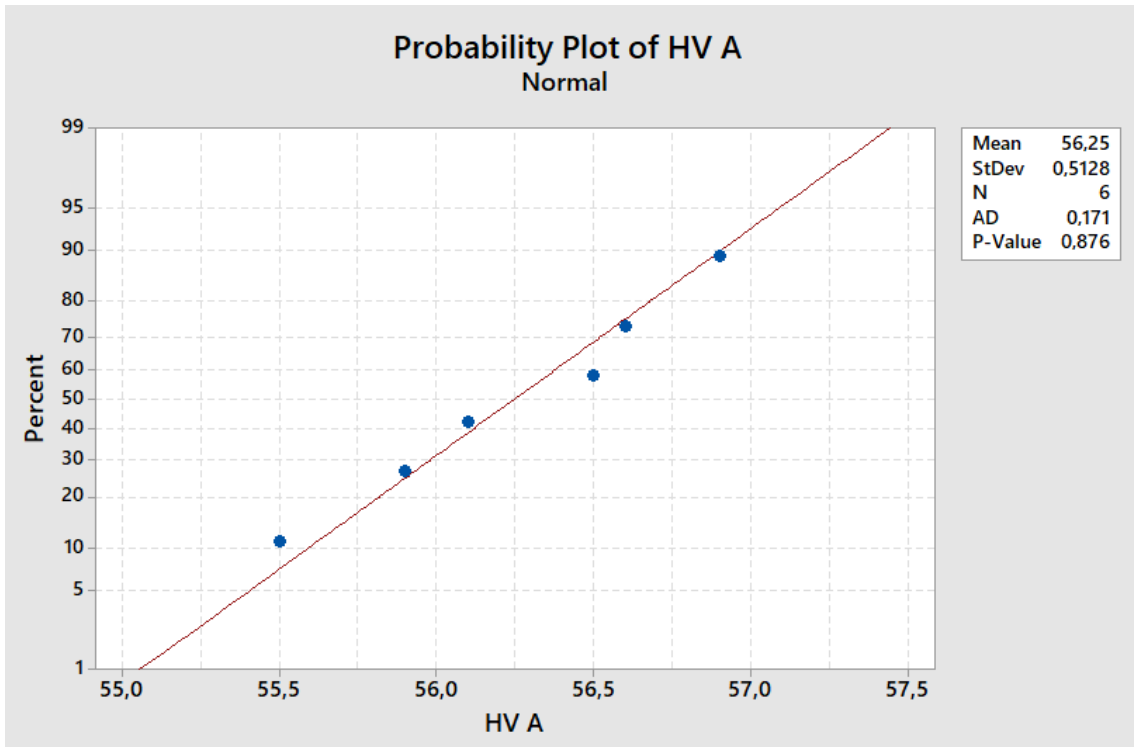


Figura 35 - Gráfico dos valores de dureza de Vickers da amostra A.

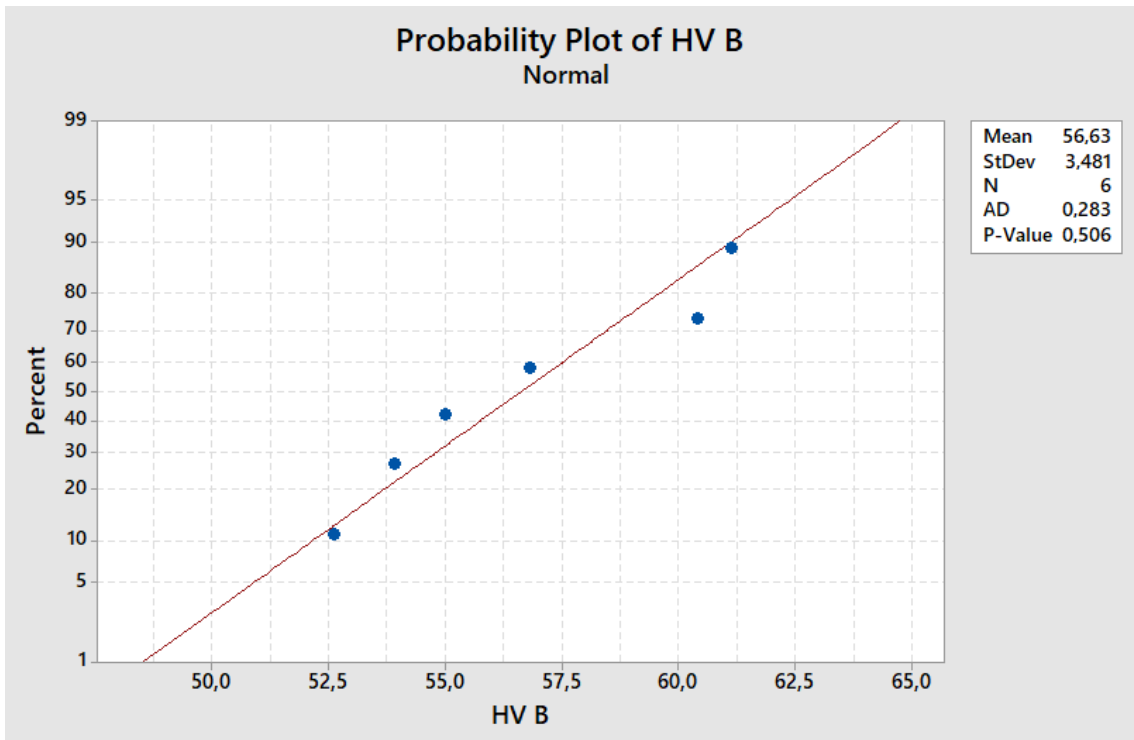


Figura 36 - Gráfico dos valores de dureza de Vickers da amostra B.

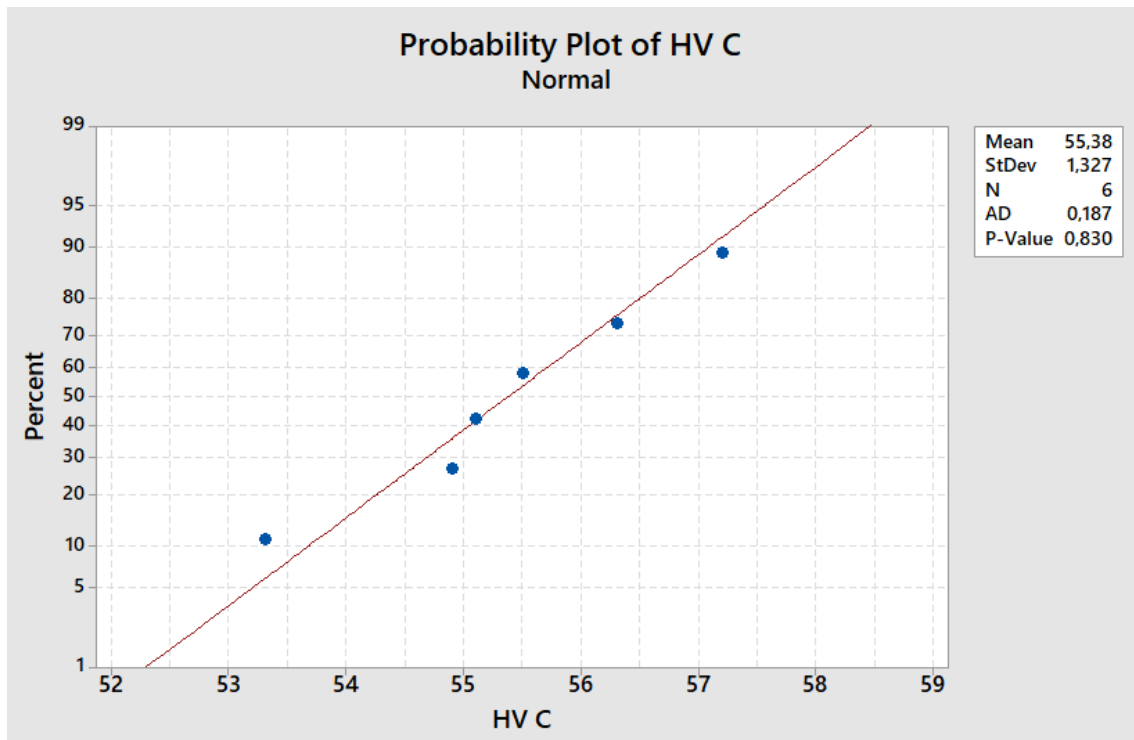


Figura 37 - Gráfico dos valores de dureza de Vickers da amostra C.

Como se pode verificar na tabela 10, o valor-p foi superior ao nível de significância α definido (0,05), em todos os testes, confirmando assim que os resultados obtidos seguem uma distribuição normal. Com a média do valor de dureza de cada amostra, calculou-se então a média total, 56,087, que está de acordo com o valor consultado na pesquisa bibliográfica, de 57,44 (Singh et al., 2016).

Tabela 10 - Teste de normalidade aos resultados dos ensaios de dureza de Vickers.

n	Amostra	p-value	p-value > α	Média	Desvio padrão	Média total
6	A	0,876	✓	56,25	0,513	56,087
	B	0,506	✓	56,63	3,481	
	C	0,83	✓	55,38	1,327	

5.2. Análise da microestrutura e defeitos

A microestrutura da liga Al7SiMg sem tratamento térmico é caracterizada por uma estrutura dendrítica grosseira, como se pode ver na Figura 38, onde se identifica a fase primária α -Al e a fase eutética Al-Si, com uma forma não circular e não uniformemente distribuída. Esta fase eutética resulta da nucleação durante a solidificação do material. São estas características microestruturais que definem as propriedades mecânicas das ligas de fundição, especialmente em termos de resistência à fadiga e resistência mecânica, e que podem limitar as suas aplicações industriais. Estas propriedades mecânicas podem ser melhoradas alterando a microestrutura deste tipo de ligas. Para o efeito são utilizados tratamentos térmicos, que permitem obter uma combinação ótima de ductilidade e resistência em ligas Al-Si-Cu-Mg. Normalmente, em peças de alumínio vazado, são utilizados o tratamento com solução, a têmpera e o envelhecimento. (Singh et al., 2016)

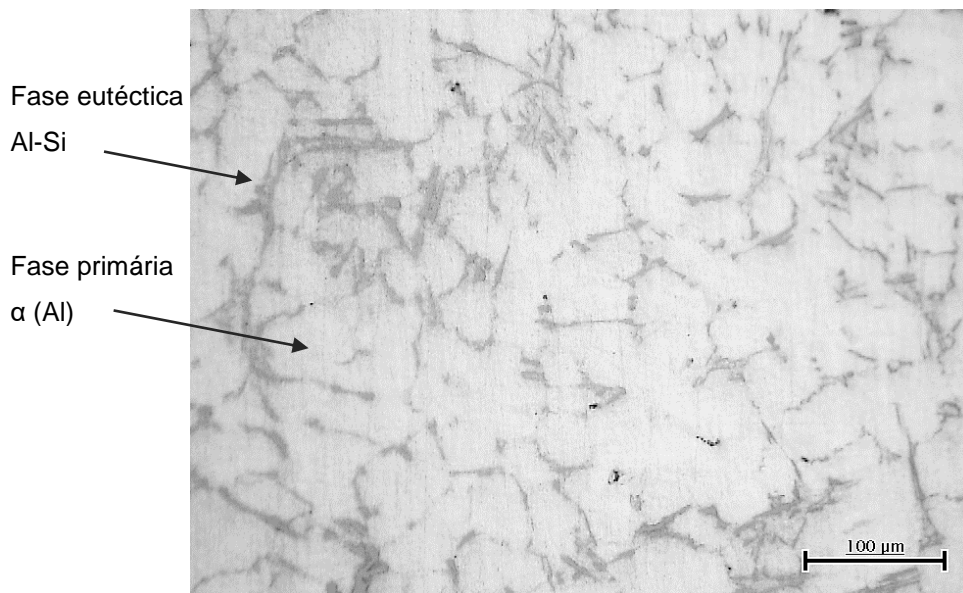


Figura 38 - Microestrutura do material, com uma ampliação de 20x, identificando-se o alumínio primário e a fase eutética Al-Si, e alguma porosidade. Amostra A14 100 μ m.

O tipo de defeito encontrado na Figura 39 foi o mais comum. Pode-se concluir que provavelmente a fase eutética solidificou, mas o líquido não foi capaz de preencher o espaço entre as dendrites, espaço intereutético, ou preencheu este espaço mas, ao solidificar contraiu, deixando espaço vazio, em forma de porosidade ou cavidade. Uma solução para colmatar estas falhas seria o uso de um inoculante aquando da fusão do metal. Em último caso, a utilização de um tipo de fundição com pressão, como a fundição injetada ou de extrusão. No entanto, estes processos de fundição são mais dispendiosos

do que a fundição por moldação em areia, logo, de evitar quando o custo de produção for um fator chave.

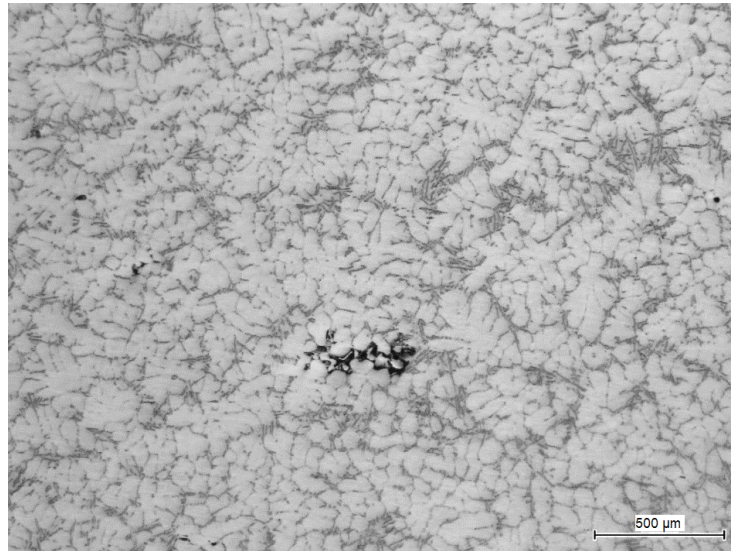


Figura 39 - Defeito presente na amostra A11, com uma ampliação de 5x.

De seguida apresentam-se os defeitos mais encontrados consoante a zona da peça estudada. Além de porosidade, encontraram-se defeitos do tipo ‘olho de peixe’ (Figura 40 a)), ocorridos quando existe diferença temperatura de solidificação dos cristais, e bolhas (Figura 43 c)) que ocorrem quando a areia de moldação impede o escoamento de gases, ficando estes retidos no interior do metal. Como se pode verificar, as zonas 1 e 4 apresentaram um maior número de defeitos, assim como de maior dimensão, consistentes com o facto de serem zonas de maior concentração de tensões. Já as zonas 2 e 3, apesar de apresentarem defeitos, estes são menos frequentes e de menor dimensão.

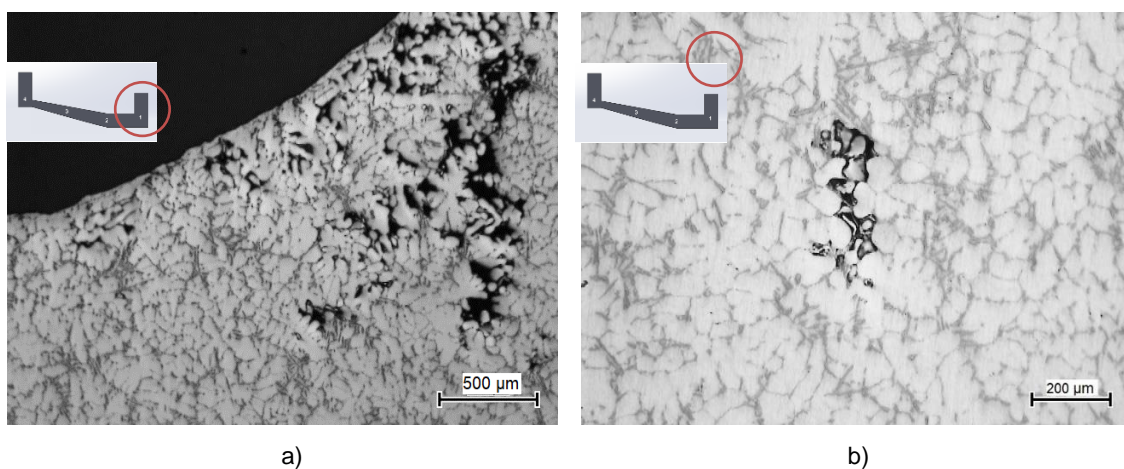
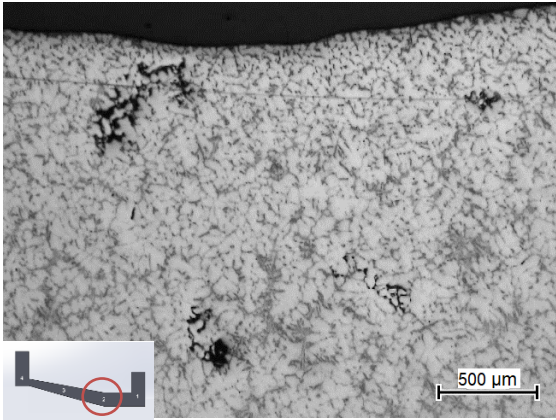
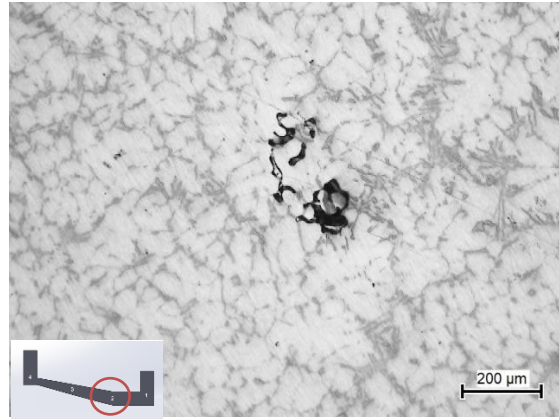


Figura 40 - Defeitos encontrados na amostra A11 - a) Borda interior; b) centro da amostra.

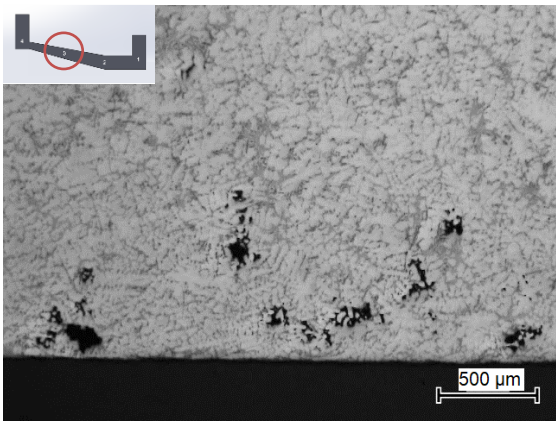


a)

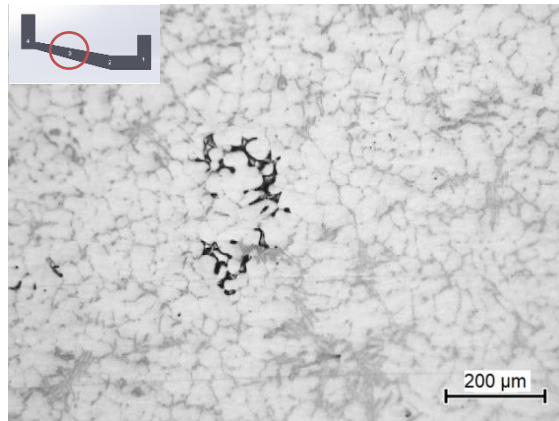


b)

Figura 41 - Defeitos encontrados na amostra A12 - a) Borda interior; b) centro da amostra.

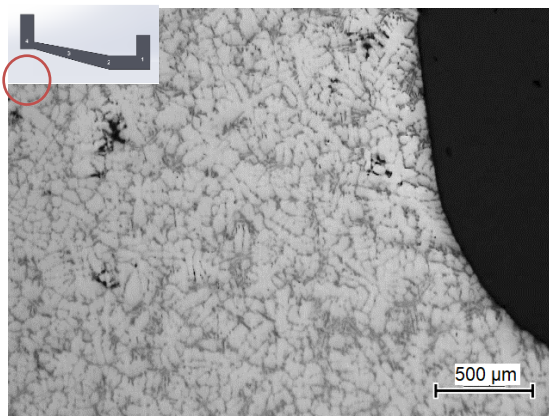


a)

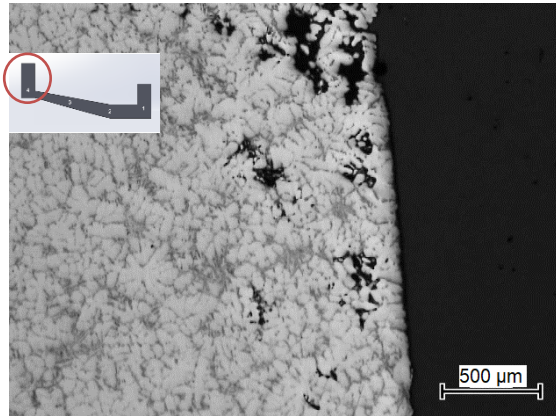


b)

Figura 42 - Defeitos encontrados na amostra A13 - a) Borda inferior; b) centro da amostra.



a)



b)

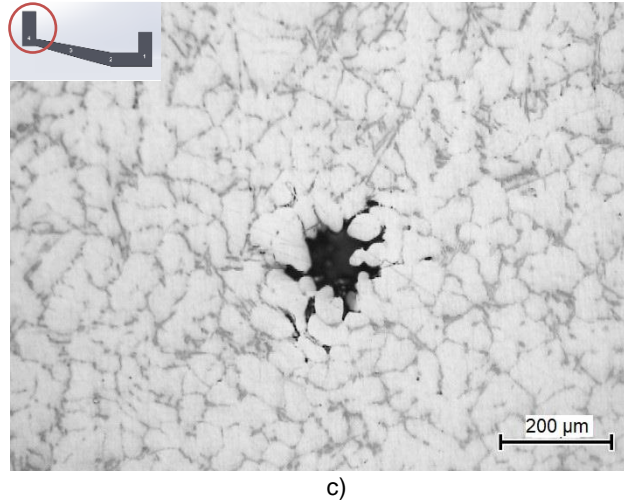


Figura 43 - Defeitos encontrados na amostra A14 - a) Borda interior; b) zona acima da borda interior; c) centro da amostra.

5.3 Contabilização de defeitos

Depois de realizado o varrimento de todas as amostras, foi utilizado o programa *ImageJ* para tratar as imagens obtidas e contabilizar os defeitos encontrados. Na Figura 44 mostra-se uma imagem de microscópio ótico de um dos defeitos, comparando-se com o resultado do seu tratamento realizado no programa.

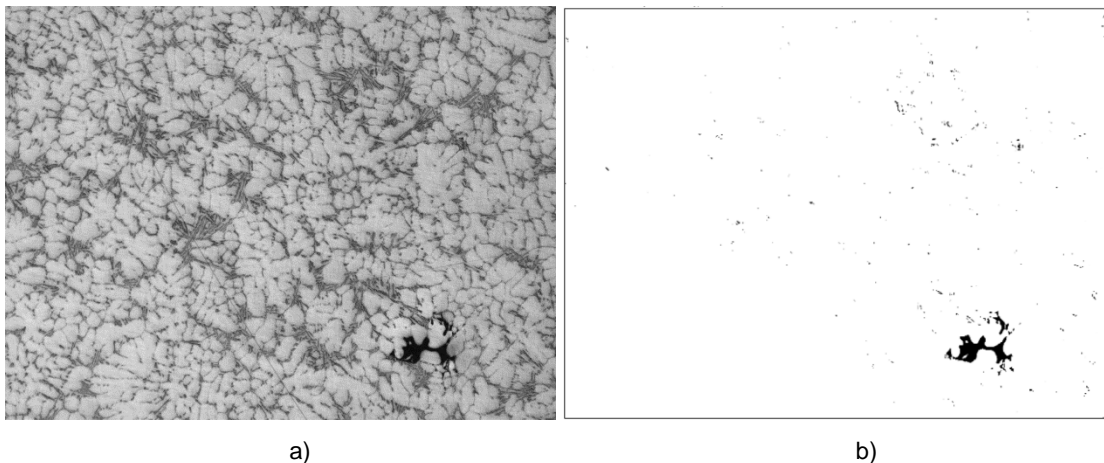


Figura 44 - Exemplificação do tratamento de imagem efetuado com o programa *ImageJ* – a) imagem de microscópio ótico original; b) imagem tratada no programa.

Realizado este tratamento de imagem, quantificaram-se os defeitos encontrados, obtendo-se uma lista com a área referente a cada defeito encontrado. Uma vez que o valor que consta no cálculo da tensão limite de fadiga é relativo à área total de defeitos por peça, foi de seguida calculado este valor para cada peça. Este procedimento foi realizado para cada amostra, sequência a sequência.

Nas Figuras 45, 46 e 47 apresenta-se a quantificação de defeitos das peças A, B e C respetivamente. Como se pode verificar, a distribuição é muito semelhante nos três casos, no entanto a peça C apresenta um menor número de defeitos relativamente às peças A e B, o que pode estar relacionado com o facto de ter sido utilizada neste vazamento uma caixa de moldação em madeira, sem revestimento. A peça B apresenta um maior número de defeitos, que é consistente com um vazamento mais turbulento, logo com maior inclusão de gases no metal.

O tipo de defeito mais frequentemente encontrado, em todas as peças, foi de pequena dimensão ($\leq 10 \mu\text{m}^2$), o que corresponde a porosidade. Além da porosidade, as amostras apresentaram alguns defeitos de maior dimensão ($\geq 100 \mu\text{m}^2$), que correspondem a bolhas ou defeitos do tipo 'olho de peixe'.



Figura 45 - Distribuição de defeitos na peça A.

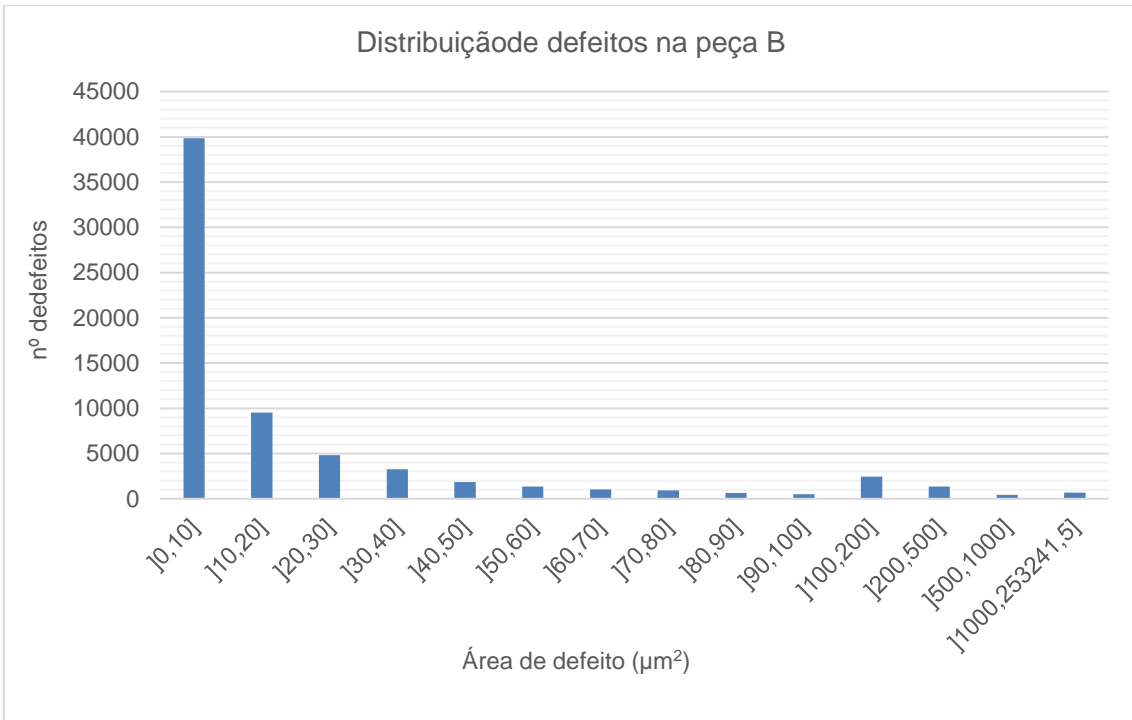


Figura 46 -Distribuição de defeitos na peça B.



Figura 47 - Distribuição de defeitos na peça C.

5.4 Previsão de vida

Uma vez contabilizados os defeitos e calculada a área total de defeito para cada peça, e tendo já o valor da dureza de Vickers da liga, foi possível calcular então a tensão limite de fadiga, σ_w , cujos resultados se apresentam na Tabela 11 (com o valor de dureza médio das amostras) e Tabela 12 (com o valor de dureza de cada amostra).

Tabela 11 - Resultados da área total de defeito e do cálculo da tensão limite de fadiga para cada peça, utilizando a equação 2.2, tendo em conta a dureza média das três amostras.

	area (μm^2)	$\sqrt{\text{area}}$ (μm)	HV	σ_w (MPa)
A	7892809	2809,414	56,087	51,29
B	8137609	2852,65		51,03
C	3824030	1955,513		57,87

Tabela 12 - Resultados da área total de defeito e do cálculo da tensão limite de fadiga para cada peça, utilizando a equação 2.2, tendo em conta a dureza de cada amostra.

	area (μm^2)	$\sqrt{\text{area}}$ (μm)	HV	σ_w (MPa)
A	7892809	2809,414	56,25	51,31
B	8137609	2852,65	56,63	51,08
C	3824030	1955,513	55,38	58,07

Na Figura 48 encontra-se representado o valor da tensão limite de fadiga calculado neste trabalho sobre a curva S-N obtida por Tajiri (Tajiri et al., 2014). Para um intervalo de $50 \leq \sigma_w \leq 60$ tem-se um número de ciclos N_f superior a 10^7 sendo que a partir deste valor se considera que a amostra apresenta vida infinita à fadiga. Este resultado é bastante positivo, significando que, apesar dos defeitos de fabrico encontrados, esta peça pode ser fabricada por fundição por moldação em areia com uma larga margem de segurança.

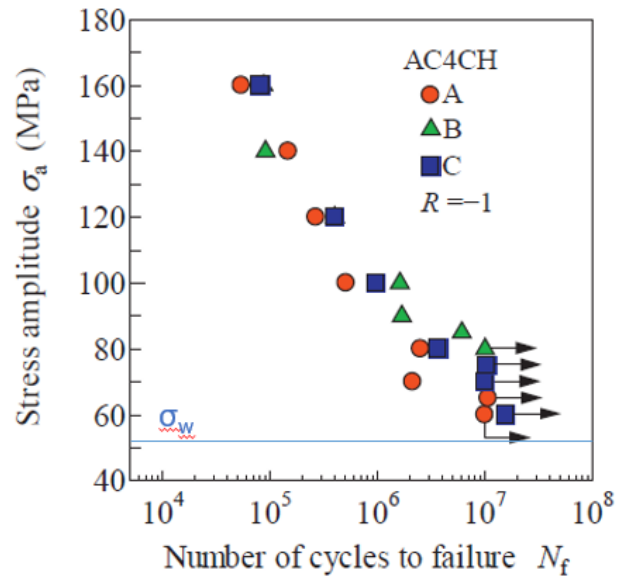


Figura 48 - Representação do valor de tensão limite de fadiga (σ_w) calculado, sobre a curva S-N de Tajiri. (Tajiri et al., 2014)

6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho foi projetada e construída uma melhoria à estrutura de suporte dos fornos de fundição e tratamentos térmicos existente no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI. Foi tida especial atenção para as diretivas de Higiene e Segurança no Trabalho e a boa postura dos operadores/investigadores durante o trabalho com os fornos. As principais alterações consistiram na subida da plataforma de trabalho, de modo a melhorar a posição de operação; a reconstrução dos degraus segundo as normas vigentes; a construção de uma segunda plataforma de modo a possibilitar que dois operadores/investigadores trabalhem com os fornos em simultâneo; a adição de corrimãos a cada plataforma, onde se achou necessário, por uma questão de segurança. O custo relativo ao material de construção utilizado no layout foi de 549,32 euros, encontrando-se o respetivo orçamento no anexo B.

A nova estrutura ficou pronta a ser utilizada, no entanto foi identificada uma avaria no controlador do forno de fundição e sugere-se a aquisição de um novo controlador deste tipo, uma vez que todos os outros equipamentos se encontram a funcionar corretamente. Sugere-se o modelo RKC REX-P250, que é utilizado no controlo do forno do laboratório de fundição do CENIMAT, e se mostra adequado. Este modelo encontra-se descontinuado, no entanto ainda se encontra à venda, por um preço menor. Em alternativa, existe um modelo mais recente da mesma gama, o PF900, que garante apoio técnico por mais tempo após a compra.

De modo a garantir uma correta utilização do laboratório de fundição, foi realizada uma pesquisa das diretivas em vigor para o trabalho de fundição, no âmbito da Higiene e Segurança no Trabalho. Desta pesquisa resultou um conjunto de indicações referentes principalmente ao EPI a utilizar aquando do trabalho com os fornos por forma a minimizar os riscos a este associados. O custo relativo ao EPI a utilizar foi de 957,46 euros por operador, constando o respetivo orçamento no anexo D.

Das três peças fabricadas por vazamento em moldação em areia da liga de alumínio (AlSi7Mg), foram preparadas as respetivas amostras, seguindo-se a realização dos ensaios de dureza de Vickers, em que se obtiveram valores semelhantes aos encontrados na pesquisa bibliográfica, ou seja, 56 HV. Tendo estes valores validados, seguiu-se a inspeção de todas as amostras ao microscópio ótico. Desta observação concluiu-se que a liga AlSi07Mg apresentava uma microestrutura dentrítica grosseira, α -Al, e silício eutético com uma forma não circular e não uniformemente distribuído. Os vários tipos de defeitos de fabrico inerentes ao processo foram também estudados, tendo-se revelado consistentes com a pesquisa bibliográfica, ou seja, porosidades, 'olho

de peixe, e bolhas. Por último, foi realizado um varrimento a todas as amostras no microscópio ótico, cujas imagens foram depois tratadas utilizando o programa *ImageJ*, que permitiu contabilizar todos os defeitos encontrados, e calcular a sua área total. Concluiu-se que a área média de defeitos nas três peças é de 6618149 μm^2 . Com os valores da dureza de Vickers e a área de defeito total de cada peça, calculou-se a previsão de vida à fadiga das peças fabricadas, obtendo-se tensões limite médias na ordem dos 53 MPa, ou seja, para uma durabilidade maior que 10^7 ciclos (vida infinita). Este trabalho é de grande valor técnico-científico, pois foi realizado a partir de peças acabadas de fabricar, ou seja, antes de estarem sujeitas a esforços de serviço como o caso estudado por Tajiri (Tajiri et al., 2014).

Para trabalhos futuros sugere-se:



- No laboratório de Fundição do DEMI criado no âmbito desta tese deve ser projetada uma chaminé e respetiva conduta para o escoamento dos gases resultantes do processo de fundição, uma vez que estes gases são nocivos e a sua inalação pode provocar problemas graves de saúde, tanto a curto como longo prazo.
- O estudo da durabilidade de peças fabricadas pelo mesmo processo de fundição e com o mesmo material, utilizando outros métodos de previsão de vida, isto é, tendo em conta que as fórmulas utilizadas para a previsão de vida à fadiga são empíricas.
- Realização de ensaios experimentais de fadiga e propagação de fenda, tendo em conta a localização dos defeitos (à superfície ou no interior da peça) para análise da sua influência na durabilidade das peças.
- Obtenção de modelos empíricos de previsão de tensão limite de fadiga e do valor do limiar de intensidade de tensões na propagação de fendas de fadiga.
- A realização de ensaios de fadiga à liga AlSi03Mg, utilizando provetes em bruto e provetes maquinados, com o objetivo de determinação de curvas S-N e curvas de propagação de fenda. Análise das superfícies de fratura dos provetes através de microscopia eletrónica de varrimento, para compreensão dos modos de falha.
- A medição dos poros e/ou defeitos de fabrico a 3D, utilizando tomografia.
- Simulação a 2D e a 3D da propagação de fissuração a partir de defeitos de fabrico.

Bibliografia

- Askeland, D., & Fulay, P. (2009). *Essentials of materials science and engineering-Cengage*.
- ASTM E384-2016: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. (2016). *ASTM Standards*. <https://doi.org/10.1520/E0384-16>
- Branco, C. A. G. de M., Ferreira, J. M., Costa, J. D. da, & Ribeiro, A. S. (2012). *Projecto de Órgãos de Máquinas* (3rd ed.). Fundação Calouste Goulbenkian.
- Buffière, J. Y., Savelli, S., Jouneau, P. H., Maire, E., & Fougères, R. (2001). Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanisms of model Al-Si7-MgO.3 cast Al alloys. *Materials Science and Engineering A*, 316(1–2), 115–126.
- Félix, R. M. C. (2008). *Desenvolvimento do Fabrico de Próteses por Fundição de Precisão à Medida do Paciente*. FEUP.
- Ferreira, J. M. G. de C. (2010). *Tecnologia da Fundição*. (Fundação Calouste Gulbenkian, Ed.) (3rd ed.). Lisboa.
- Hirsch, J. (2011). Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design *, 52(5), 818–824.
- Jiang, H., Bowen, P., & Knott, J. F. (1999). Fatigue performance of a cast aluminium alloy Al-7Si-Mg with surface defects. *Journal of Materials Science*, 34(4), 719–725.
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. ASM International.
- Nekere, M. L., & Singh, A. P. (2012). Optimization of Aluminium Blank Sand Casting Process by using Taguchi's Robust Design Method. *International Journal of Quality Research*, 6(1), 81–97.
- Russo, J. (2012). *Adaptação de dois fornos eléctricos para tratamentos térmicos e fundição*.
- Sand Casting. (2008). Retrieved February 23, 2017, from <http://www.custompartnet.com/wu/SandCasting>
- Sinalux. (2017). Catálogo Sinalux PT. Retrieved from http://www.sinalux.com/website/Catalogo_Sinalux_PT.pdf
- Singh, R. K., Telang, A., & Das, S. (2016). Microstructure and Mechanical Properties of

- Al-Si Alloy in As-cast and Heat Treated Condition. *American Journal Of Engineering Research (AJER)*, (8), 133–137.
- Sonsino, C. (2005). Structural durability of cast aluminium gearbox housings of underground railway vehicles under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 27(8), 944–953.
- Tajiri, A., Nozaki, T., Uematsu, Y., & Kakiuchi, T. (2014). Fatigue limit prediction of large scale cast aluminum alloy A356. *Procedia Materials Science*, 3, 924–929.
- Teles, P., Pereira, C., & Ribeiro, P. (n.d.). Guia Acessibilidades-DL_163-06_8Ago.
- The Aluminum Association. (2017a). Aircraft & Aerospace Aluminum. Retrieved July 19, 2017, from <http://www.aluminum.org/product-markets/aircraft-aerospace>
- The Aluminum Association. (2017b). Automotive Aluminum in Cars and Trucks. Retrieved July 19, 2017, from <http://www.aluminum.org/product-markets/automotive>
- Tiryakioglu, M., Tiryakioglu, E., & Askeland, D. R. (1997). Statistical investigation of the effects of the shape , size and superheat on solidification times of castings, (January).
- Ueno, A., Nishida, M., Miyakawa, S., Yamada, K., & Kikuchi, S. (2014). ΔK th estimation of aluminum die-casting alloy by means of \sqrt{a} area method. *Recent Advances in Structural Integrity Analysis: Proceedings of the International Congress*, (3), 99–103.
- Velhinho, A. (2003). Fundição centrífuga de compósitos de alumínio / SiC com gradiente funcional de propriedades: processamento e caracterização. Lisboa: FCT-UNL.
- Wang, W., Stoll, H. W., & Conley, J. G. (2010). Sand Casting Processes. In *Rapid Tooling Guidelines For Sand Casting* (pp. 1–10). Boston, MA: Springer US.

Anexo A – Ficha técnica da liga AlSi7Mg

	<h2 style="margin: 0;">RAFFMETAL</h2> <p style="margin: 0; font-weight: normal;">THE ALUMINIUM EVOLUTION</p>													
Leghe di alluminio in colata continua. Continuous casting aluminium alloys														
<p>Standard: UNI EN 1676 and 1706</p> <p>Alloy group: Al Si 7 Mg</p> <p>Alloy designation: EN AB and AC 42100 Al Si 7 Mg 0.3</p> <p>Replaces:</p>														
CHEMICAL COMPOSITION %														
ALLOY		ELEMENTS												
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Individual impurities	Global impurities
EN AB 42100	min	6,5				0,30						0,10		
	max	7,5	0,15	0,03	0,10	0,45	-	-	0,07	-	-	0,18	0,03	0,10
		6,5				0,30						0,10		
		7,5	0,15	0,02	0,10	0,45	-	-	0,07	-	-	0,18	0,03	0,10
MECHANICAL FEATURES DETECTED FROM SEPARATE CASTING TEST SPECIMENS														
Casting process	Temper designations	Rm Tensile strenght		Sp 0,2 Yield strenght		A Elongation		HB Brinell hardness						
		EN 1706	N/mm2	EN 1706	N/mm2	EN 1706	%	EN 1706	HBW	HB				
		Mpa		Mpa		%		HBW						
SAND (as cast)	F		140 - 220		80 - 140		2 - 6		45 - 60					
Partially Aged	T64		200 - 270		120 - 170		4 - 10		60 - 80					
Hardened and Aged artif.	T6	230	240 - 320	190	220 - 280	2	3 - 6	75	80 - 110					
SHELL (as cast)	F		180 - 240		90 - 150		4 - 8		50 - 65					
Partially Aged	T6	290	250 - 340	210	220 - 280	4	5 - 9	90	80 - 100					
Hardened and Aged artif.	T64	250	220 - 270	180	120 - 180	8	6 - 12	80	65 - 85					
PHYSICAL PROPERTIES (indicative values subject to the UNI EN and ex DIN Standards)														
DENSITY	2.66 Kg/dm ³		THERMAL CONDUCTIVITY at 20°C		160 - 180 W/(m K)									
MELTING RANGE or MELTING POINT	550 °C		LINEAR THERMAL EXPANSION from 20 t 100°C		-									
	625 °C		LINEAR THERMAL EXPANSION from 20 t 200°C		22.0-10-6/°C									
SPECIFIC HEAT (at 100)°	0.92 J/Gk		LINEAR THERMAL EXPANSION from 20 t 300°C		-									
LINEAR SHRINKAGE IN SAND	1.1 - 1.2 %		SUGGESTED MAXIMUM TEMPERATURE		780 °C									
LINEAR SHRINKAGE IN SHELL PROCES	0.8 - 1.1 %		SUGGESTED CASTING TEMPERATURE											
ELECTRIC CONDUCTIVITY	21 - 27 MS/m		°in sand		680 - 750 °C									
MODULUS OF ELASTICITY	7400 m/mm ²		°in shell		680 - 750 °C									
			°in pressure die		-									
TECHNOLICICL FEATURES, QUALITATIVE INDICATIONS														
STRENGTH AT ELEVATED TEMPERATURE(to 200°C)	LOW		RESISTANCE TO HOT TEARING		SMALL									
GENERAL RESIATANCE TO CORROSION	GOOD		PRESSURE TIGHTNESS		GOOD									
MACHINABILITY	GOOD		WELDABILITY		EXCELLENT									
CASTABILITY	GOOD		DECORATIVE ANODISING		BAD									
POLISHING	MEDIUM		PROTECTIVE ANODISING		BAD									
AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE PER LA QUALITÀ CERTIFICATO DA DNV = UNI EN ISO 9001:2008 =		Raffmetal S.p.a. via malpaga, 82 25070 Casto (BS) tel:0365.890.100 fax 0365.899.327 qualita@raffmetal.it vendite@raffmetal.it			AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE AMBIENTALE CERTIFICATO DA DNV = UNI EN ISO 14001:2004 =									



RAFFMETAL

THE ALUMINIUM EVOLUTION



Leghe di alluminio in colata continua. Continuous casting aluminium alloys

Standard: **UNI EN 1676 and 1706**

Alloy group: **Al Si 7 Mg**

Alloy designation: **EN AB and AC 42100 Al Si 7 Mg 0.3**

Replaces:

GENERALITIES REGARDING USE

The ingot recasting process must be carried out as quickly as possible and overheating must be avoided (maximum melting temperature 760°C).

The iron tools that can come into contact with the liquid metal must be appropriately painted to prevent contamination of the alloy.

The best results for refining the alloy are reached by treatments with inert gases such as nitrogen and/or argon with the intent of removing the hydrogen dissolved and the oxides present in the bath of molten metal. Better distribution of the gas in the molten metal is obtained by the use of relevant rotors. Pay particular attention that all transfer operations of the molten metal are performed with less turbulence possible. It is recommended to leave the molten metal at rest for a few minutes before starting casting. Careful skimming operations of the bath are recommended.

The re-cycling of risers and casting appendixes is allowed but within the limits of 40% of the total weight of the load.

SPECIFICITY REGARDING USE

For the realisation of casting with sensitive thickness, it is recommended to envision "modification" treatment.

If Strontium is used as the modifying element, it is recommended to operate with Strontium that do not exceed 300 ppm in order to prevent excess reactivity of the alloy in the liquid state with consequent oxidation and gassing phenomena

Remember that the contents of Strontium exceeding 100 ppm are normally sufficient to obtain a well-modified structure.

Considering the relative level of purity of the alloy's chemical composition (reduced content of Cu - Zn - Fe) it is important to consider the level of cleanliness of the melting furnaces and the attention of the re-cycling of the risers in order to prevent induced pollution that could jeopardise the technical properties of the alloy.

TYPICAL USE

Alloy suitable for realising casting with complex design, obtaining high mechanical features; good pressurised sealing and weldability. It is used in the motor, railways, aeronautical and armaments industries (heads and bases)

EN 42100 alloy is in compliance with the EN 601 foodstuff Standard.

COMPARISON WITH EQUIVALENT OR SIMILAR FOREIGN STANDARDS

	ITALY	GERMANY	FRANCE	G.B.R.	USA	ISO	JAPAN	TURKEY
	UNI	(Din1725/5-86)	(NFA57-105)	(BS1490-88)	(ASTM B179-82)	(3522-84)	(JIS H2211-92)	(ETIAL)
Equivalent	UNI 8024	GALSI 7 MG	AS 7 G03		A 356.2	Al Si 7 Mg	C 4 CV	
Similar				LM 25				

HEAT TREATMENTS

Hardening 520 - -535°C after pre-heating of 4 - 10 hours in aging conditions

Complete Artificial Aging at 155 - 165°C for 6 - 8 hours.

Partial aging at 150 - 160 °C for 2 - 3 hours.

Limitation of liability

The contents of these technical sheets gave an informative purpose and do not constitute a warranty regarding the properties stated. The decisions based on this information are taken under the responsibility and risk of the user and do not exclude it from the verification. If the former are not carried out, we do not assume any liability.

**AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE
PER LA QUALITÀ CERTIFICATO DA DNV
= UNI EN ISO 9001:2008 =**

Raffmetal S.p.a.
via malpaga, 82 25070 Casto (BS)
tel:0365.890.100 fax 0365.899.327
qualita@raffmetal.it
vendite@raffmetal.it

**AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE
AMBIENTALE CERTIFICATO DA DNV
= UNI EN ISO 14001:2004 =**

Anexo B – Orçamento do material de construção



Máquinas e Ferramentas

Rua dos Três Vales, 44 B - 2825-024 Caparica - Portugal
Tel.: 351 212 946 600
NIF: 503 391 026
Capital Social: 62.349,74€ - Reg. na C.R.C. Almada

Orçamento **ORC A17/670**

Folha Nº 1 de 1 Original

Natureza: Orçamento 2ªVIA

Exmo.(s) Senhor(es)

NOVA ID FCT - ASSOCIAÇÃO PARA A INOVAÇÃO E
DESENVOLVIMENTO DA FCT
FACULDADE DE CIENCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE NO
ISBOA CAMPUS DE CAPARICA
2829-516 CAPARICA

Euroferramentas, Lda. - Rua dos Três Vales nº 44 B Monte da Caparica 2825-163 Caparica NIF: PT503391026

Emitido em 2017-04-10	Pagamento 30 Dias	Validade 30 Dias	Entrega	Vencimento em 2017-05-10
V/ Documento DªBEATRIZ	Cliente Nº 321	V/ Contribuinte 513010661	Transporte N/Viatura	

REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO	QUANT.	UNI	P.VENDA S/IVA	DESC	VALOR LIQUIDO	IVA	Entrega (Dias úteis)
1380210	TUBO AÇO QUAD. 40 X 40 X 1.5 (6MT)	9,00	UNI	13,90 €		125,10 €	23 %	0
0853049	CANTONEIRA L 40 X 5 (6MT)	4,00	UNI	18,00 €		72,00 €	23 %	0
div	CANTONEIRA L 40X20 X4 (6MT)	5,00	UNI	17,50 €		87,50 €	23 %	0
div	GRELHA GALVANIZADA 1000 X 2000	18,00	UNI	9,00 €		162,00 €	23 %	0

Incidência	Taxa	Valor IVA	TOTAL BRUTO	446,60 EUR
446,60	23%	102,72	DESCONTO LINHA	0,00 EUR
0,00	0%	0,00	DESCONTO GLOBAL 0,0% + 0,0% + 0,0%	0,00 EUR
0,00	0%	0,00	TOTAL LÍQUIDO	446,60 EUR
0,00	0%	0,00	TOTAL IVA	102,72 EUR
			TOTAL PORTES	0,00 EUR
			TOTAL	549,32 EUR

Este documento não constitui documento de transporte, nos termos do Decreto-Lei n.º 147/2003
Emitido por programa certificado nº 1411/AT - Sage
Este documento não serve de fatura

IBAN BCP: PT50 0033 0000 0001 5907 9671 0 10

Utilizador: Lobo - Terminal: 4
© Sage licenciado a: EUROFERRAMENTAS LDA /503391026

Anexo C – Desenhos técnicos

Neste anexo apresentam-se os desenhos técnicos referentes à estrutura de suporte dos fornos existente no Laboratório de Tecnologia Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da NOVA aquando do início deste trabalho (Layout 1) e à nova estrutura criada (Layout 2).

Apresentam-se os seguintes desenhos técnicos:

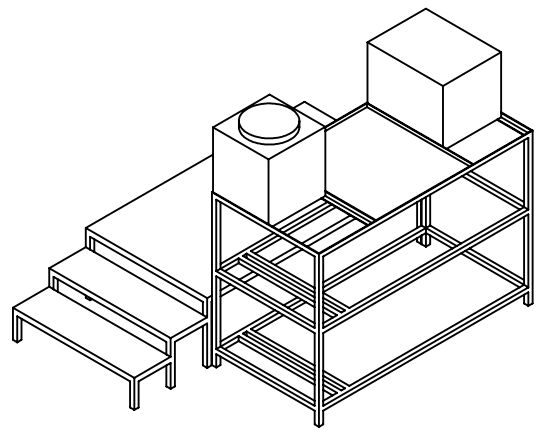
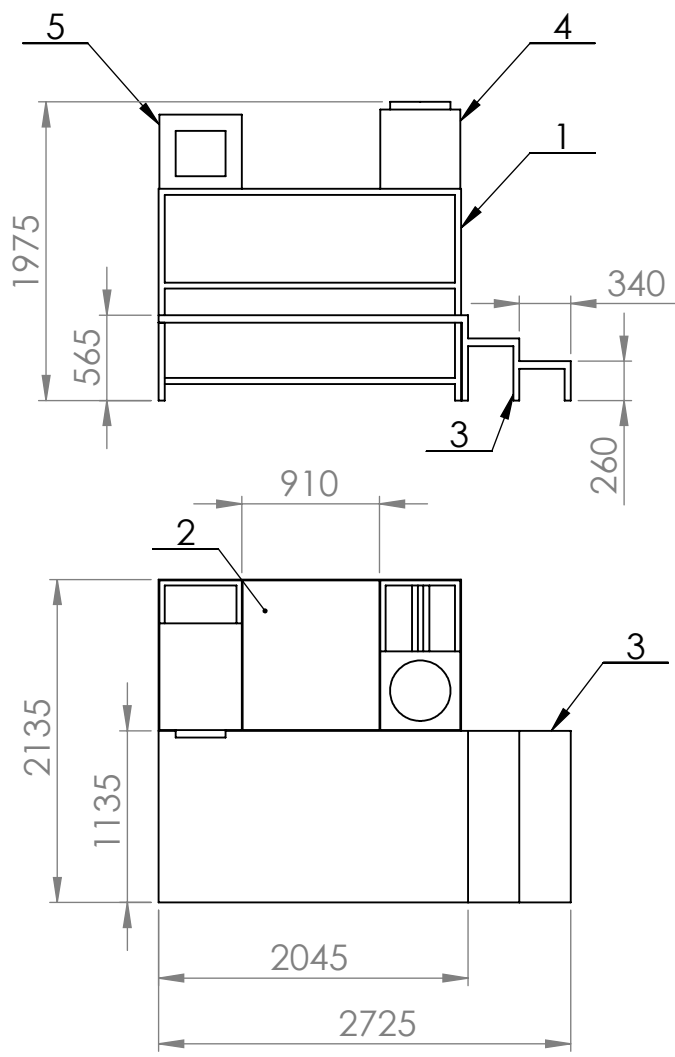
Layout 1 (assembly):

- Suporte dos fornos 1
- Estrado 1

Layout 2 (assembly):

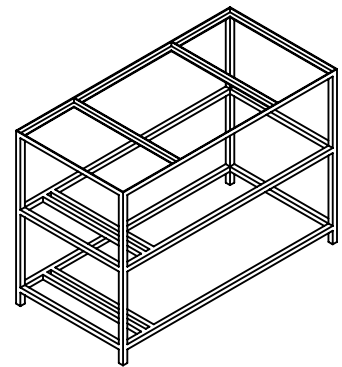
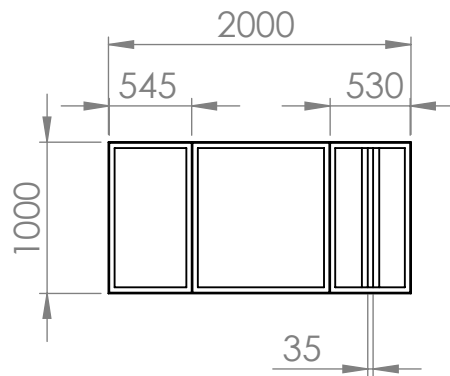
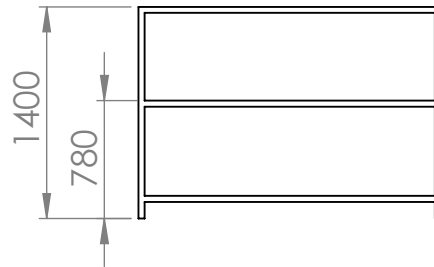
- Suporte dos fornos 2
- Estrado 1
- Estrado 2

Estrado

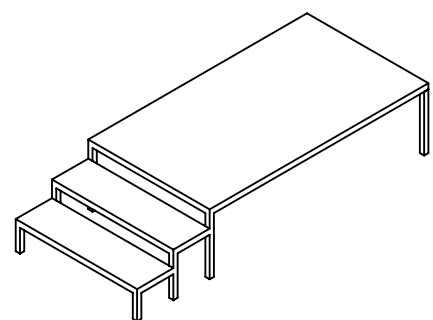
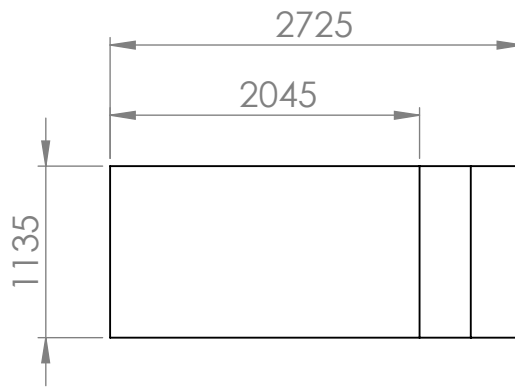
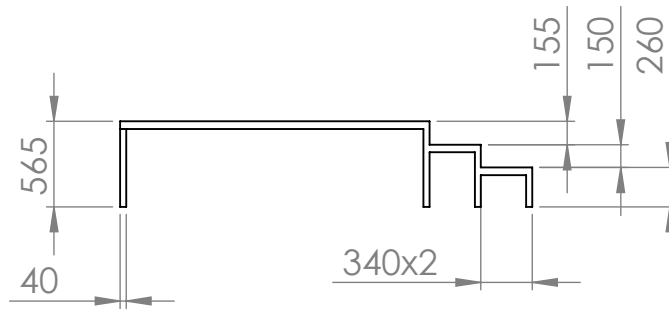


Item nº	Componente	Qty.
1	Suporte dos fornos 1	1
2	Mesa	1
3	Estrado 1	1
4	Forno de fundição	1
5	Forno de tratamentos térmicos	1

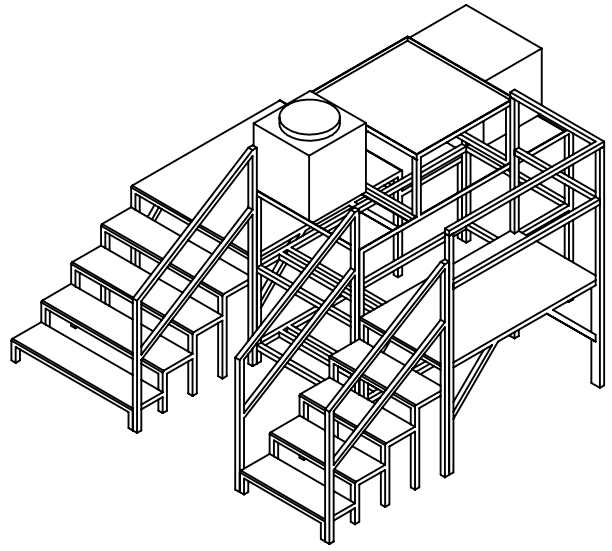
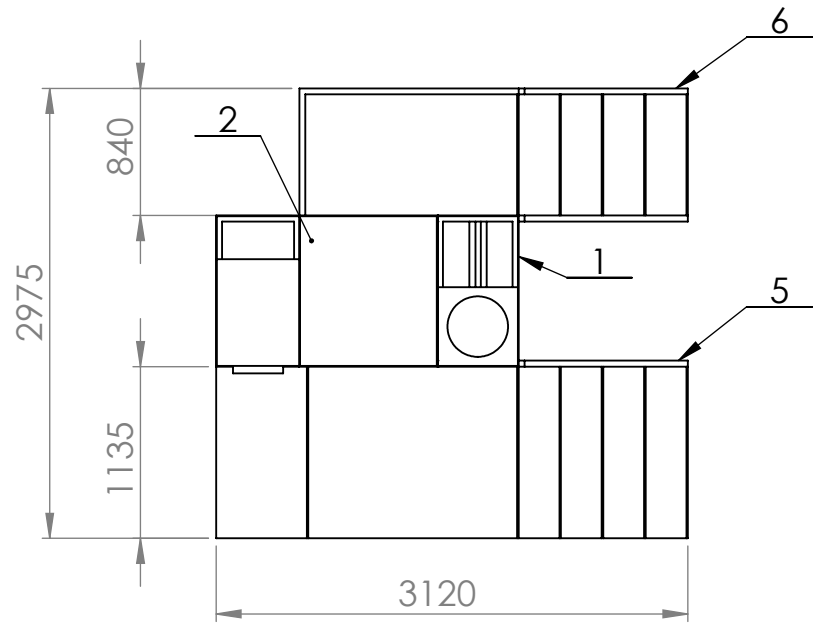
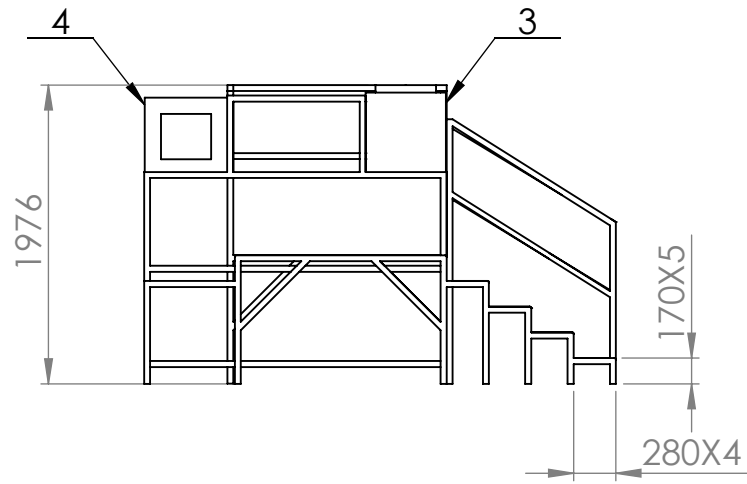
Desenha.	22/09/17		Dissertação de Mestrado	Faculdade de Ciências e Tecnologia				
Copiado	22/09/17							
Verific.								
Visto								
Escalas	Layout 1							
1:50								
Toleran.								
				Substituí o des. n.º				
				Substituído por:				



Desenha.	22/09/17		Dissertação de Mestrado	Faculdade de Ciências e Tecnologia				
Copiado	22/09/17							
Verific.								
Visto								
Escalas	Suporte dos fornos 1							
1:50								
Toleran.								
			Substitui o des. n.º					
			Substituído por:					

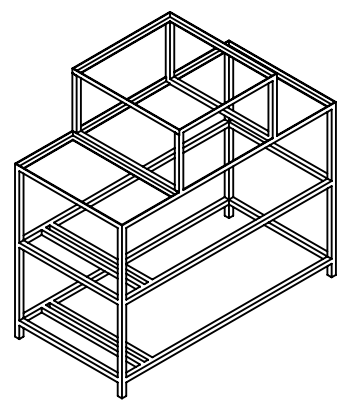
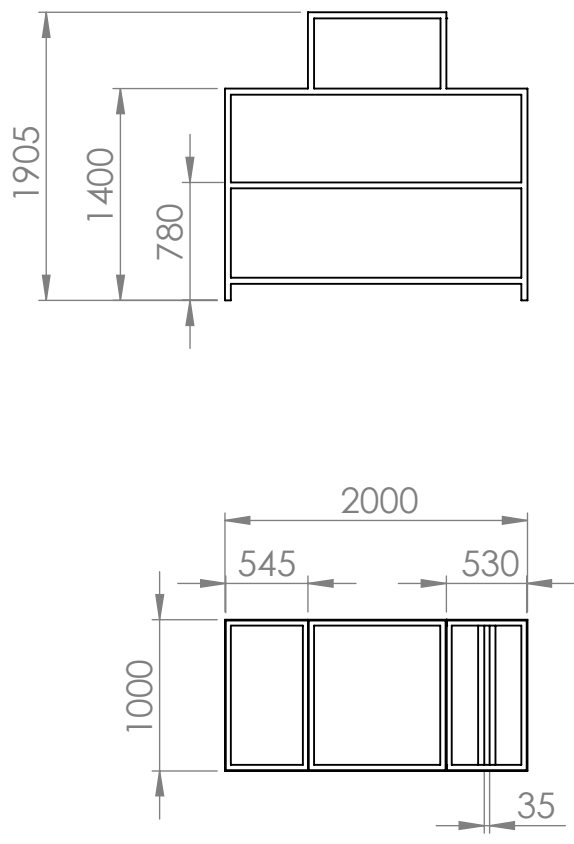


Desenha.	22/09/17		Dissertação de Mestrado	Faculdade de Ciências e Tecnologia				
Copiado	22/09/17							
Verific.								
Visto								
Escalas	Estrado 1							
1:50								
Toleran.								
			Substitui o des. n.º					
			Substituído por:					

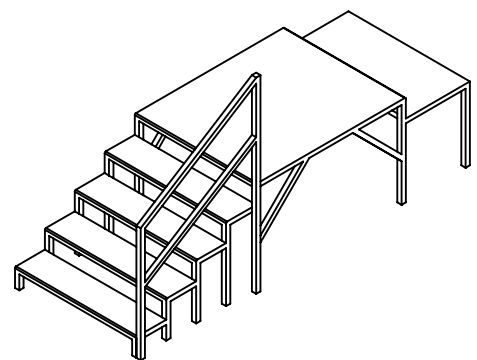
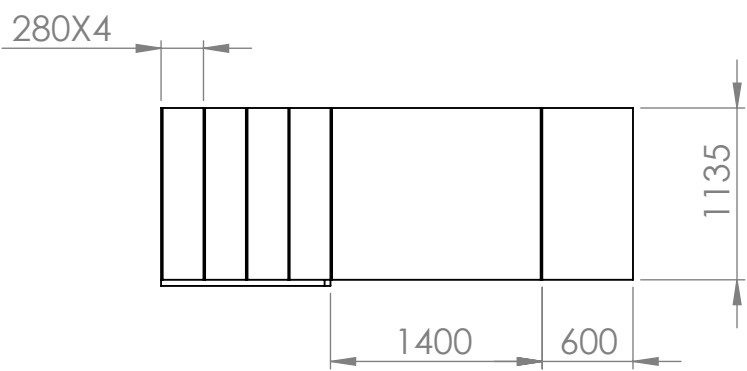
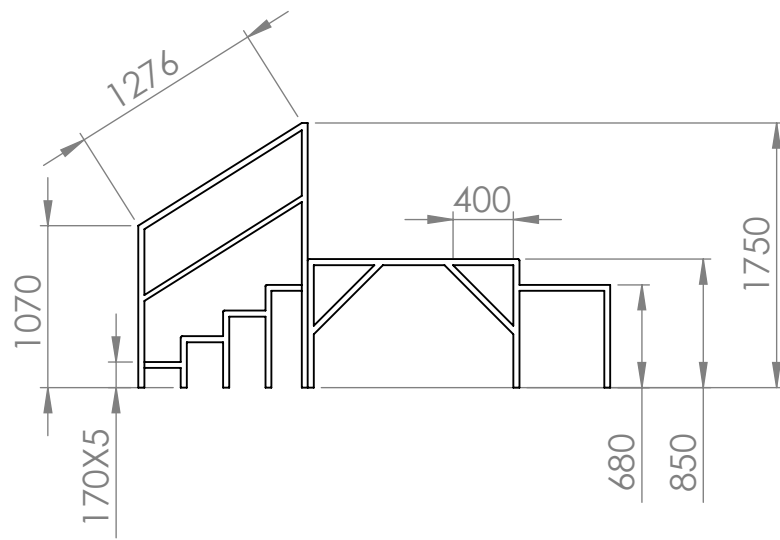


Item nº	Componente	Qtd.
1	Suporte dos fornos 2	1
2	Mesa	1
3	Forno de fundição	1
4	Forno de tratamentos térmicos	1
5	Estrado 2	1
6	Estrado 3	1

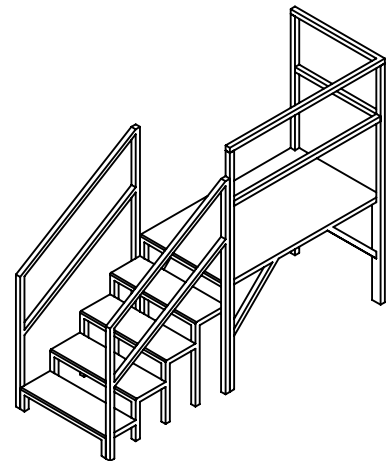
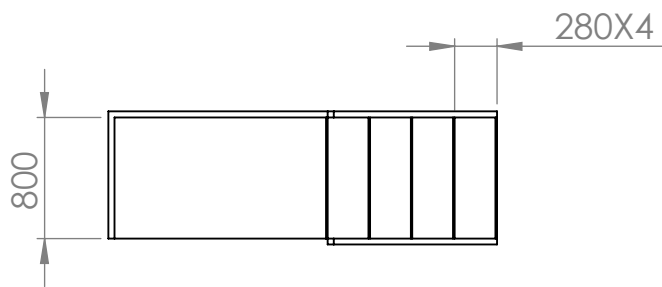
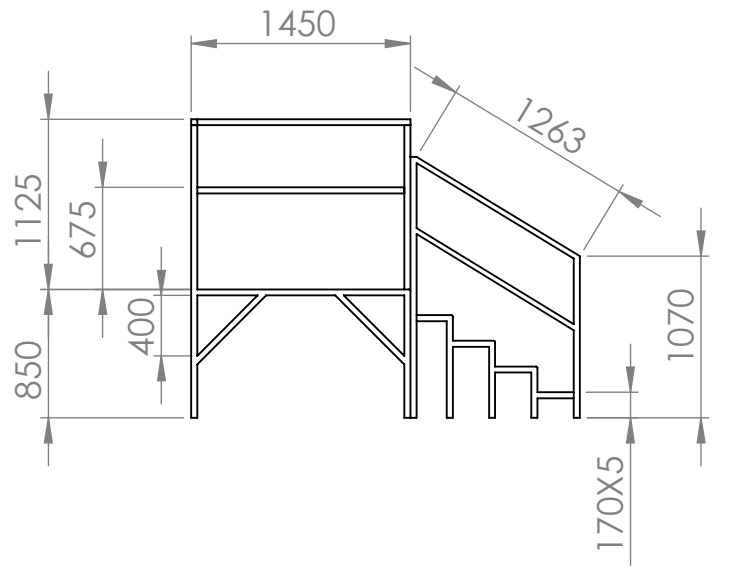
Desenha.	22/09/17	Dissertação de Mestrado	Faculdade de Ciências e Tecnologia			
Copiado	22/09/17					
Verific.						
Visto						
Escalas	1:50	Layout 2				
Toleran.						
		Substituí o des. n.º				
		Substituído por:				



Desenha.	22/09/17		Dissertação de Mestrado	Faculdade de Ciências e Tecnologia				
Copiado	22/09/17							
Verific.								
Visto								
Escalas	Suporte dos fornos 2							
1:50								
Toleran.								
			Substitui o des. n.º					
			Substituído por:					



Desenha.	22/09/17		Dissertação de Mestrado	Faculdade de Ciências e Tecnologia					
Copiado	22/09/17								
Verific.									
Visto									
Escalas	Estrado 2								
1:50									
Toleran.									
				Substitui o des. n.º					
				Substituído por:					



Desenha.	22/09/17		Dissertação de Mestrado	Faculdade de Ciências e Tecnologia				
Copiado	22/09/17							
Verific.								
Visto								
Escalas	Estrado 3							
1:50								
Toleran.								
			Substituí o des. n.º					
			Substituído por:					

Anexo D – Orçamento do EPI



SINTIMEX - Soc. Int. de Importações e Exportações, Lda
 Av. Infante D. Henrique Lote 9B, 1849-034 Lisboa
 NIB: BES 0007 0014 0001 5910008 97 | NIPC: 500 251 118
 Tel: 217 577 212 | 912 002 021 | Fax: 217 581 735
 www.sintimex.pt | sintimex@sintimex.pt

Beatriz Arraiano

Data	Documento	Número
06.04.2017	Proposta	6228/2017

ORIGINAL

Cliente	Telefone	Modo de Expedição	Condições de Pagamento	Vossa Consulta	Vendedor
1000	244 222 006		PRONTO PAGAMENTO		Sintimex

Referência	Designação	Quant.	Un.	Pr.Unit.	Desc.	Total	Prazo Entrega
	GIOBATKEVALU BATA KEVLAR-ARAMIDA ALUMINIZADA 13K (FECHO WELCRO) http://goo.gl/Fwq7bn	1,0	un.	260,00		260,00	20 DIAS
	GIOBOTKEVALU BOTAS KEVLAR-ARAMIDA ALUMINIZADO 05K http://www.sintimex.pt/pt/botas-kevlar-aramida-aluminizado-05k	1,0	un.	62,00		62,00	20 DIAS
	GIOCAPKEVALU CAPUZ KEVLAR-ARAMIDA ALUMINIZADA FRENTE DOURADA 01KVD http://www.sintimex.pt/pt/capuz-kevlar-aramida-aluminizada-01kv	1,0	un.	354,55		354,55	20 DIAS
	LEMFUSS340 BOTAS LEMAITRE FUSION SOUDE S3 HRO N.40 http://www.sintimex.pt/pt/botas-lemaitre-fusion-soude-s3	1,0	par	63,48		63,48	IMEDIATA S.V
	WISEADACAP VISEIRA FHK67 FOCO1.5A AD.CAPACETE (ELECTRICIDADE) http://www.sintimex.pt/pt/viseira-fonderman-fhk67/foco-1.5a	1,0	un.	34,15		34,15	IMEDIATA S.V
	FREDOUAROAL FRENTE FOCO3G GOLD/VERDE PARA ARO ALUMINIO FONDERMAN FH66 http://www.sintimex.pt/pt/viseira-fonderman-fh66-gold	1,0	un.	68,99		68,99	IMEDIATA S.V
	RIBIHR540 LUVAS RIBY IHR 540 (5 dedos) http://www.sintimex.pt/pt/luva-riby-topfire-ih540	1,0	par	75,80		75,80	IMEDIATA S.V
	GIOLUV3K38 LUVA 5 DEDOS 03K - 38CM FIBRA ARAMIDA ALUMINIZADA (3ª CAT)	1,0	par	33,64		33,64	IMEDIATA S.V
	PORTES10KG PORTES ATE 10Kg Portes cobrados para encomendas inferiores a 100€+IVA.	1,0	un.	4,85		4,85	

Software PHC - Processado por programa certificado nº 0006/AT (20160904)-Este documento não serve de fatura

Nota: Estes preços não incluem IVA

Validade da Proposta: 30 DIAS

TOTAL do DOCUMENTO

957,46

[Para consultar a Ficha Técnica do produto, clique na hiperligação em cada um dos produtos.](#)

Anexo E – Instruções de controlo dos fornos

Neste anexo apresentam-se as instruções de programação dos controladores dos fornos instalados no laboratório, criadas por João Russo (Russo, 2012).

A2 - Instruções básicas de programação do controlador acoplado ao forno de fundição – RKC - P 96

De forma semelhante à anterior, apresentam-se o procedimento de programação do controlador RKC P96 de modo a realizarem os programas desejados.



Figura 85 – Curva programada, exemplo 2



Segmento 1

Temperatura desejada;

- Premir as setas UP/DOWN até atingir a temperatura desejada.
- De seguida carregar em SET

Escolha do programa

- De modo a configurar o programa desejado, premir PTN1/PTN2
- Premir SET, o número 1 indica o canal seleccionado.





Segmento 2

Temperatura desejada;

- Premir as setas UP/DOWN até atingir a temperatura desejada.
- De seguida carregar em SET



- Depois de definido o segmento, premir SET para continuar a definir o programa.
- Caso se queira terminar e gravar o programa premir END.



Tempo de execução do segmento;

- Pressionar as setas UP/DOWN até atingir o tempo necessária à execução do segmento.
- Premir SET, de modo a definir o próximo segmento.



Tempo de execução do segmento;

- Pressionar as setas UP/DOWN até atingir o tempo necessária à execução do segmento.



Execução do programa

- Premir PTN1/PTN2 de modo a escolher qual o programa a executar, depois de seleccionado o programa premir RUN.

A1 - Instruções básicas de programação do controlador acoplado ao forno de tratamentos térmicos – RKC - P 300

Estes controladores têm como objectivo executar rampas de aquecimento e patamares isotérmicos com grande precisão. De seguida apresenta-se o procedimento de programação do controlador RKC-P300 de modo a realizar os programas pretendidos. Para isso recorreu-se a um exemplo, ilustrado na figura 84, em que os segmentos 1 e 3 consistem em duas rampas de aquecimento enquanto o segmento 2 consiste num patamar isotérmico.

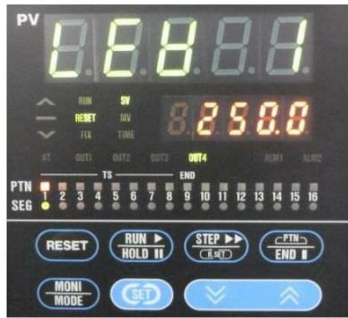


Figura 84 – Curva programada, exemplo 1

Escolha do programa;

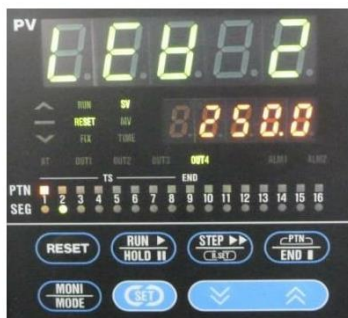
- Ao ligar o controlador, premir SET.
- Premir os botões UP/DOWN de modo a seleccionar o programa desejado (T1 a 16).
- Depois de seleccionado o programa premir SET, de modo a definir o segmento desejado.





Tempo de execução do segmento;

- Premir as setas UP/DOWN de modo a definir o tempo necessário para atingir a temperatura desejada, definida anteriormente.
- Premir SET



Tempo de execução do segmento;

- Premir as setas UP/DOWN
- Carregar em SET



Segmento 1

Temperatura desejada;

- Carregar nas setas UP/DOWN de modo a configurar a temperatura que se deseja atingir.
- Premir SET



Segmento 2

Temperatura desejada;

- Carregar nas setas UP/DOWN de modo a definir a temperatura que deseja alcançar.
- Premir SET



Segmento 3

Temperatura desejada;

- Premir UP/DOWN até atingir a temperatura desejada.
- SET

Tempo de execução do segmento;

- Carregar nas setas UP/DOWN até definir o tempo desejado de execução do segmento.



- Depois de definido o segmento, premir SET para continuar a definir o programa.
- Caso se queira terminar e gravar o programa premir END. A luz vermelha revela em que “canal” está gravado o programa enquanto as 3 luzes verdes, significam o número de segmentos programados.

Execução do programa

- Depois de programado, Premir PTN e escolher qual o programa desejado (1 a 16)
- Premir SET e em seguida RUN.



Display do controlador durante a execução do programa

- O controlador indica a verde, em cima, a leitura do termopar e a vermelho, em baixo, a temperatura desejada num determinado instante.
- Caso queira interromper a execução do programa, premir HOLD.