

**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

José Eduardo Araújo Martins

**Efeito da Aplicação de Ultrassons ao  
Processo *Squeeze Casting***

Dissertação de Mestrado

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

Trabalho efetuado sob a orientação de:

**Doutor Joaquim Barbosa**

**Doutor Hélder Puga**



## DECLARAÇÃO

José Eduardo Araújo Martins

Endereço eletrónico: jed.martins@gmail.com

Telefone: 934488317

Número do Bilhete de Identidade: 13610723

Título dissertação /tese

Efeito da Aplicação de Ultrassons ao Processo *Squeeze Casting*.

Orientadores:

Doutor Joaquim Barbosa

Doutor Hélder Fernandes Puga

Universidade do Minho

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado:

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

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE  
QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_



Tese entregue em 12 de julho de 2013  
e defendida a 22 de julho de 2013

Júri

**Nuno Peixinho**, Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Presidente).

**Carlos Alberto Silva Ribeiro**, Professor Associado c/ Agregação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Arguente).

**José Joaquim Carneiro Barbosa**, Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho (Orientador).

**Hélder Puga**, Professor Convidado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho (Orientador).



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Doutor Hélder Puga pelo tempo, atenção e paciência demonstrada ao longo deste trabalho. Sem o seu esforço, partilha de conhecimentos e ambiente que proporcionou não teria sido possível a concretização deste projeto. Esteve sempre disponível para o esclarecimento de todas as dúvidas, independentemente da sua pertinência, hora ou dia da semana.

Ao Doutor Joaquim Barbosa, pela ajuda e incentivo, e pelas condições que proporcionou.

Aos meus parceiros de laboratório e amigos, Ruben, Hugo, Tânia, Joana, Marta, Rui e Luísa, pela amizade e bom ambiente criado no melhor laboratório do mundo. Foi indispensável o vosso contributo, incentivo e força em todos os momentos.

Aos funcionários dos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica que contribuíram para a realização deste projeto.

À minha família pelo apoio e amor incondicional durante esta caminhada. E muito especialmente à Ana, por tudo, o resto são pormenores.



## RESUMO

As ligas de alumínio são globalmente utilizadas em inúmeras atividades. Sendo estas, indústrias muito competitivas, existe a necessidade de um melhoramento constante de todos os intervenientes no processo produtivo. Essas melhorias têm como objetivo reduzir custos e/ou melhorar o desempenho dos componentes e têm vindo a ser efetuadas quer pelo recurso a novas técnicas de produção, quer pelo desenvolvimento de novas ligas/composições.

Neste âmbito, o objetivo central deste projeto consistiu no estudo da conjugação de duas tecnologias distintas, ***Squeeze Casting*** e ***Ultrassons***, para analisar a melhoria das propriedades mecânicas das ligas de alumínio, decorrentes dessa combinação. Inicialmente, foram realizados testes para cada uma das tecnologias singularmente, os quais se constituíram como ensaios de controlo, tendo sido depois avaliada a sua conjugação para diversos parâmetros.

Foi desenvolvido um projeto para um equipamento experimental com vista à realização dos ensaios, mas, por motivos alheios ao autor, não foi possível a sua construção.

No entanto, com recurso à colaboração de uma empresa local, foram realizados ensaios para estudar o efeito da conjugação das duas tecnologias. Mais especificamente, foi estudado o efeito de dois níveis de pressão distintos – 5 e 10 MPa – e de dois métodos de aplicação de ultrassons ao banho metálico – direto isotérmico por via de um radiador acústico e indireto através da coquilha, durante a solidificação.

Foram avaliadas as características microestruturais, a dureza e a densidade das amostras dos diferentes ensaios. Verificou-se que as amostras resultantes da conjugação das tecnologias apresentam características microestruturais muito favoráveis – afinadas e modificadas (silício e componentes intermetálicos) – quando comparadas com os ensaios de cada uma das tecnologias singularmente. Foi possível a obtenção de amostras com cerca de 98.5% da densidade teórica com a aplicação direta da pressão contra os 95,6% obtidos apenas com desgaseificação. Os resultados relativos à dureza não foram conclusivos.

Os resultados parecem indicar que a conjugação das duas tecnologias é benéfica, permitindo a obtenção de componentes complexos, afinados e livres de porosidades com pressões relativamente baixas.



## ABSTRACT

The aluminum alloys are used all over the world in countless industrial activities. These activities are very competitive and demand constant improvement of all the parts involved in the productive process. Those improvements, aimed to reduce costs or improve the components performance, are done by using new production technics or by the development of new alloys and their treatment.

In this context, the main goal of the project consists in the study of the conjugation of two different technologies, **Squeeze Casting** and **Ultrasonic Melt Treatment**, to analyze the improvement of the mechanical characteristics in aluminum alloys resultant of that combination. An equipment project was developed to build an experimental machine for the trials, but, due to the state of the national economy, that goal was not achieved. Even though, thanks to a local company, it was possible to conduct the trials. The first ones were made with each technology alone and were considered control trials. Afterwards, the combination of the two technologies was evaluated using different parameters – two pressure values (5 and 10 MPa) and two ultrasonic application methods (direct isothermal, using an acoustic radiator, and indirect, through the mold, during the solidification).

Several aspects were evaluated, such as, the microstructural characteristics, the hardness and the density of each sample. The samples obtained with the combination of the two technologies were refined and modified – both the silicon and the intermetallic particles. With the application of pressure during the solidification, the density value increased (98,5% of the theoretical density against 95,6% without the application of pressure). The hardness trials were inconclusive.

The results seem to indicate that the combination of these two technologies is interesting and might allow the production of complex, refined and pores free components. Additionally, it may allow the reduction of the pressure values used in the Squeeze Casting operations.



# ÍNDICE

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>v</b>
<b>Índice.....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Capítulo 1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introdução.....	1
1.2. Enquadramento .....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Motivação .....	2
1.5. Estrutura do documento.....	2
<b>Capítulo 2. Fundamentos teóricos .....</b>	<b>5</b>
2.1. Alumínio e as suas ligas .....	5
2.1.1. Solidificação de Ligas Metálicas .....	7
2.2. <i>Squeeze Casting</i> .....	8
2.2.1. Ligas utilizáveis no processo <i>Squeeze Casting</i> .....	9
2.2.2. Evolução do <i>Squeeze Casting</i> .....	10
2.2.3. <i>Semi-Solid Casting</i> .....	10
2.2.4. Parâmetros do processo <i>Squeeze Casting</i> .....	12
2.2.5. Defeitos característicos do <i>Squeeze Casting</i> .....	13
2.2.6. Microestruturas características de <i>Squeeze Casting</i> .....	14
2.3. Tratamento Acústico de Metal Líquido .....	15
2.3.1. Tecnologia MMM (Multifrequência, Multimodo, Modulada).....	15
2.3.1. Métodos de aplicação da energia acústica ao banho metálico .....	16
2.3.2. Efeitos acústicos no banho metálico e parâmetros importantes .....	17

2.4.	Projeto na Engenharia Mecânica.....	20
2.4.1.	Requisitos e especificações .....	22
2.4.2.	Projeto concetual.....	22
2.4.2.1.	Instrumentos criativos.....	23
2.4.3.	Segurança em máquinas industriais .....	24
<b>Capítulo 3. Projeto de um equipamento experimental de <i>Squeeze casting</i>.....</b>		<b>27</b>
3.1.	Projeto Concetual.....	27
3.1.1.	Apresentação do problema .....	27
3.1.2.	Condições de sistema.....	28
3.1.3.	Geração de conceitos .....	28
3.1.4.	Avaliação, escolha e descrição das propostas para a solução final.....	34
3.2.	Projeto Estrutural .....	38
3.2.1.	Definição posicional.....	38
3.2.2.	Estudo de resistência mecânica.....	41
3.3.	Projeto hidráulico .....	46
3.4.	Segurança.....	48
<b>Capítulo 4. Procedimento e Metodologia Experimental.....</b>		<b>49</b>
4.1.	Equipamentos.....	50
4.2.	Descrição do ambiente experimental .....	51
4.3.	Procedimento Experimental.....	52
4.3.1.	Parâmetros do material .....	52
4.3.2.	Parâmetros de processamento .....	52
4.3.3.	Condução dos ensaios.....	54
4.4.	Técnicas de caracterização.....	55
<b>Capítulo 5. Apresentação e Discussão de Resultados.....</b>		<b>59</b>
5.1.	Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe em bruto de fundição.....	61
5.2.	Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito simples de <i>Squeeze Casting</i> . 62	
5.3.	Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada apenas com tratamento acústico .....	64
5.4.	Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito conjugado de <i>Squeeze Casting</i> e tratamento acústico isotérmico antes do vazamento.....	66

5.5. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito conjugado de <i>Squeeze Casting</i> e tratamento acústico contínuo durante a fase de pressão (processo indireto) .....	71
5.6. Discussão dos Resultados .....	73
5.6.1. Análise da afinação da matriz $\alpha$ -Al .....	73
5.6.2. Análise das partículas de silício.....	77
5.6.3. Análise dos compostos intermetálicos.....	78
5.6.4. Análise da densidade/porosidades.....	78
5.6.5. Durezas.....	79
<b>Capítulo 6. Conclusão.....</b>	<b>81</b>
6.1. Sugestão de trabalhos futuros .....	84
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo I – Desenhos Técnicos .....</b>	<b>89</b>



## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 2.1 – Variação do raio crítico. _____	7
Figura 2.2 – Esquema simplificado das diferenças entre <i>Squeeze Casting</i> . _____	9
Figura 2.3 – Tipos de <i>Squeeze Casting</i> . _____	9
Figura 2.4 – Evolução do <i>Squeeze Casting</i> . _____	10
Figura 2.5 – Etapas do processo de <i>Thixocasting</i> . _____	11
Figura 2.6 – Etapas do processo <i>New Rheocasting</i> . _____	12
Figura 2.7 – Microestrutura de AlSi7, por <i>Squeeze Casting</i> direto com 150 MPa. _____	15
Figura 2.8 – Sistema de ultrassons baseado na tecnologia MMM. _____	16
Figura 2.9 – Cavitação acústica. _____	17
Figura 2.10 – Microestrutura característica de uma liga AlSi9Cu3 processada isotermicamente por ultrassons à temperatura de 615°C. _____	19
Figura 2.11 – Fases da resolução de um projeto. _____	21
Figura 2.12 – <i>Design process</i> . _____	21
Figura 2.13 – Dificuldades causadas por ineficiência na fase de especificações. _____	22

### Capítulo 3

Figura 3.1 - Desenho da primeira solução para as funções 1 e 2. _____	29
Figura 3.2 – Desenho da segunda solução para as funções 1 e 2. _____	30
Figura 3.3 – Opções para as vigas estruturais. _____	31
Figura 3.4 – Sistema de anilhas cónicas para limitar a dissipação de energia acústica. _____	31
Figura 3.5 – Grampos para coquilhas circulares. _____	32
Figura 3.6 – Chapa de proteção anti-salpicos. _____	32
Figura 3.7 – Sistema de cavilhas e barras para suporte da zona de vazamento e apoio dos hidráulicos. _____	33
Figura 3.8 – Desenho da segunda solução para a fixação das placas de trabalho. _____	34
Figura 3.9 – Sistema de <i>Squeeze Casting</i> com fecho vertical e aplicação de pressão vertical. _____	37
Figura 3.10 – Cilindros hidráulicos a reutilizar. _____	38
Figura 3.11 – Dimensões gerais da estrutura. _____	39
Figura 3.12 – Solução de fixação do cilindro superior. _____	40
Figura 3.13 – Fixação das placas de trabalho e de suporte do cilindro inferior. _____	40
Figura 3.14 – Fixação da estrutura ao solo. _____	41
Figura 3.15 – Esforços suportados pela placa suporte do cilindro superior. _____	42
Figura 3.16 - Simulação do comportamento da placa suporte do cilindro superior quando sujeita à carga máxima do cilindro. _____	43
Figura 3.17 - Simulação do comportamento da estrutura de suporte. _____	45
Figura 3.18 – Cilindros reutilizados no projeto do equipamento em estudo. _____	46

Figura 3.19 – Válvulas 4/2.	47
Figura 3.20 – Esquema do sistema hidráulico planeado.	47

## Capítulo 4

Figura 4.1 – Forno e Cadinho utilizados nos ensaios.	50
Figura 4.2 – Moldação permanente utilizada nos ensaios.	51
Figura 4.3 – Equipamentos de ultrassons baseados na tecnologia MMM utilizados.	51
Figura 4.4 – Aparato experimental.	52
Figura 4.5 – Microscópio ótico com capacidade de gravação das imagens observadas.	55
Figura 4.6 – Exemplo do processamento das micrografias no <i>software Image Pro Plus</i> .	56
Figura 4.7 – Equipamento para a realização das indentações do ensaio de durezas – Modelo <i>DURASCAN</i> da marca <i>EMCOTEST</i> .	57
Figura 4.8 – Exemplo da medição das diagonais de uma indentação para medição da dureza.	58

## Capítulo 5

Figura 5.1 – Microestrutura do ensaio realizado em bruto de fundição;	61
Figura 5.2 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito simples de pressão (5MPa) durante a solidificação.	62
Figura 5.3 – Microestrutura do ensaio realizado com tratamento acústico isotérmico a 620°C.	64
Figura 5.4 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (5MPa) e tratamento acústico isotérmico a 620°C.	66
Figura 5.5 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (10MPa) e tratamento acústico isotérmico a 620°C.	68
Figura 5.6 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (10MPa) e tratamento acústico isotérmico a 640°C.	69
Figura 5.7 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (10MPa) e tratamento acústico contínuo durante a solidificação.	71
Figura 5.8 – Micrografias de todas as amostras na ampliação 100x.	73
Figura 5.9 – Gráfico relativo ao tamanho médio de grão nos diferentes ensaios.	75
Figura 5.10 – Distribuição do tamanho de grão nos diferentes ensaios.	75
Figura 5.11 – Micrografias das partículas de silício nas ampliações 200x e 500x.	77

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 2

Tabela 2.1 – Classificação das ligas de alumínio segundo o grau de silício. ....	6
Tabela 2.2 – Classificação dos métodos de aplicação da energia acústica. ....	16

### Capítulo 3

Tabela 3.1 – Lista de Peças.....	37
Tabela 3.2 – Características mecânicas do material para a estrutura do equipamento de acordo com o catálogo da empresa FRAMADA .....	41

### Capítulo 4

Tabela 4.1 – Composição da liga utilizada.....	49
Tabela 4.2 – Reações químicas durante a solidificação da liga AlSi9Cu3Fe.....	50
Tabela 4.3 – Parâmetros do processo de desgaseificação. ....	53
Tabela 4.4 – Parâmetros de processamento do tratamento ultrassônico.....	53
Tabela 4.5 – Parâmetros utilizados nos ensaios com aplicação direta dos ultrassons (isotérmica).....	53
Tabela 4.6 – Parâmetros utilizados no ensaio com aplicação indireta dos ultrassons. ....	54

### Capítulo 5

Tabela 5.1 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio realizado apenas com aplicação de pressão durante a solidificação. ....	63
Tabela 5.2 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio apenas com tratamento acústico isotérmico (620°C). ....	65
Tabela 5.3 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico isotérmico (620°C) e pressão durante a solidificação (5MPa). ....	67
Tabela 5.4 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico isotérmico (620°C) e pressão durante a solidificação (10MPa). ....	68
Tabela 5.5 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico isotérmico (640°C) e pressão durante a solidificação (10MPa). ....	70
Tabela 5.6 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico contínuo e pressão (10MPa) durante a solidificação. ....	72
Tabela 5.7 – Síntese dos dados quantitativos relativos à matriz. ....	74
Tabela 5.8 – Densidade das amostras dos vários ensaios. ....	79
Tabela 5.9 – Valores obtidos nos ensaios de dureza. ....	79



# **CAPÍTULO 1.INTRODUÇÃO**

## **1.1.Introdução**

As tecnologias da fundição são a base de toda a indústria metalomecânica. Todos os componentes fabricados em metais têm, em alguma fase do seu processo produtivo, a intervenção de alguma das tecnologias da fundição. Isto deve-se à capacidade única que estas têm de dar forma a componentes de complexidade variável, de um modo rápido e económico. A utilização de ligas metálicas leves é relativamente recente, desde finais do século XIX, e devido às suas características, em particular as das ligas de alumínio, têm destronado as ligas ferrosas em muitas aplicações nas quais estas eram tradicionalmente dominantes, como, por exemplo, em componentes para a indústria automóvel. Esta mudança resulta da evolução dos processos de fundição, quer devido à invenção de novos processos de fundição e aperfeiçoamento dos existentes, quer pelo aprimoramento das ligas utilizadas e respetivo tratamento. Neste trabalho tenta-se integrar duas tecnologias distintas (***Squeeze Casting*** e ***Ultrasons***), cada uma com objetivos ligeiramente diferentes, com vista à obtenção de componentes com a maior qualidade possível. Com a conjugação destes dois processos, pretende-se obter componentes complexos, com microestruturas afinadas e livres de porosidades. A

presente dissertação de mestrado realiza-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, com especialização em Tecnologias de Manufatura, da Universidade do Minho, e apresenta o trabalho desenvolvido pelo autor durante o ano letivo 2012/2013 sob a orientação dos Professores Hélder Puga e Joaquim Barbosa.

## 1.2. Enquadramento

O presente trabalho, efetuado no Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade do Minho e nas instalações do grupo SOLART, foi desenvolvido no âmbito de um projeto de dissertação de Mestrado do curso de Engenharia Mecânica.

## 1.3. Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são **o estudo, desenvolvimento e validação de um equipamento** para a realização de ensaios com a **conjugação de duas tecnologias distintas – o *Squeeze Casting* e o Ultrassons** – e a **averiguação da influência dos vários parâmetros processuais** (relativos ao *squeeze casting* e ao *tratamento acústico*) **nas características dos componentes obtidos.**

## 1.4. Motivação

A motivação para o desenvolvimento deste projeto adveio da necessidade de dotar a indústria de fundição de ferramentas e processos modernos que permitam a sua adaptação e crescimento no contexto atual.

## 1.5. Estrutura do documento

O documento está dividido em cinco capítulos distintos para além do presente.

No **Capítulo 2** são apresentadas e descritas as tecnologias a utilizar, bem como algumas considerações teóricas sobre o projeto em engenharia.

No **Capítulo 3** é definido todo o projeto do equipamento a desenvolver, desde a apresentação do problema, passando pela geração e seleção de conceitos e finalizando com os projetos estrutural e hidráulico.

No **Capítulo 4** são identificados e descritos os materiais, equipamento e procedimentos experimentais utilizados na validação do conceito em estudo, sendo no **Capítulo 5** analisados e discutidos os resultados dos ensaios realizados.

Por último, o **Capítulo 6** constitui a conclusão da dissertação, onde é discutido o trabalho desenvolvido e são sugeridas propostas de trabalhos futuros.



## **CAPÍTULO 2.FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

O correto desenvolvimento, projeto e construção de equipamentos está intrinsecamente dependente dos conhecimentos dos autores sobre os conceitos nos quais o funcionamento de tais equipamentos se baseia. Assim sendo, neste capítulo o autor propõe-se a abordar os temas relevantes no domínio em questão, resumindo e explicando os conceitos considerados essenciais.

Sendo que o presente projeto consiste no desenvolvimento e validação de um equipamento destinado ao estudo de processos usados na indústria da fundição, os temas específicos desta área são de especial importância. Neste ponto serão abordados os tópicos relacionados com os materiais a processar, com o *Squeeze Casting* e com o processamento acústico de banhos metálicos.

### **2.1.Alumínio e as suas ligas**

O alumínio (símbolo químico - Al) é um dos elementos metálicos mais importantes na sociedade moderna. A combinação das suas características e disponibilidade tornou-o a base da maior indústria metálica não ferrosa a nível mundial, tendo a produção industrial em 2006 atingido os 40 milhões de toneladas [1, 2]. Apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, naturalmente

o alumínio não se encontra no seu estado puro, estando sempre combinado com outros materiais, nomeadamente óxidos e silicatos [3]. Industrialmente, a matéria-prima é obtida sobretudo através do processamento da bauxite (lingote primário) ou pelo reaproveitamento de sucatas (lingote secundário).

A excelente relação peso/resistência mecânica levaram as ligas de alumínio a impor-se sobre outros metais mais tradicionais na indústria automóvel, inclusivamente em elementos essenciais ao funcionamento dos veículos como a cabeça e bloco do motor, pistões e caixas de velocidades [4]. O seu baixo peso e condutividade elétrica tornam as ligas de alumínio num material interessante para aplicações elétricas de longo curso. Para além das características anteriormente citadas, as propriedades térmicas e resistência à corrosão levaram ao monopólio na indústria de refrigeração [2]. Na indústria aeronáutica, a *Airbus* utiliza ligas de alumínio em componentes de alta responsabilidade e bastante complexos das turbinas dos seus aviões [5]. Apesar de todas estas vantagens, existe ainda grande margem de evolução na formulação das ligas de alumínio, quer no processo de fundição, quer no tratamento do metal líquido.

No âmbito do presente projeto, é pertinente o relato dos efeitos dos principais elementos de liga no desempenho do material. Os elementos mais comuns são o silício, o cobre, o ferro e o manganês. Brown, no seu trabalho intitulado “*Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*” [4], apresenta um resumo destes efeitos, no qual se baseia a descrição que se segue.

Silício – é na maioria das ligas de alumínio o principal elemento de liga. Tem o seu ponto eutético a 11,7%Si e 577°C, conforme apresentado na Tabela 2.1. O silício melhora a fluidez do banho metálico, ajudando na alimentação e reduzindo os riscos de ocorrência de fissuras a quente (*hot tearing*). A dureza da liga aumenta com o aumento do teor de silício. Contudo, esse aumento reduz a sua ductilidade, bem como maquinabilidade.

**Tabela 2.1 – Classificação das ligas de alumínio segundo o grau de silício. (Adaptado de [4])**

Liga	Teor de Silício	Temperatura de Solidificação (°C)
Baixo Teor	4-6%	625-525
Médio Teor	7.5-9.5%	615-550
Liga Eutética	10-13%	575-565
Liga Hipereutética	> 16%	650-505

Cobre – melhora a resistência mecânica, dureza e condutividade térmica da liga. Por outro lado, diminui a fluidez e a resistência à ocorrência de fissuras a quente (*hot tearing*).

Ferro – quando usado no intervalo entre [0,9 – 1%] tem a função de prevenir a adesão às paredes das moldações permanentes. Porém, altos teores de ferro tendem a diminuir a ductilidade e, conseqüentemente, a aumentar a fragilidade dos fundidos.

Manganês – a introdução de manganês nas ligas melhora a ductilidade e a contração volumétrica dos fundidos, na medida em que controla a forma das fases de ferro nas zonas intermetálicas.

### 2.1.1. Solidificação de Ligas Metálicas

Em vista a um melhor entendimento dos objetivos do projeto, é essencial descrever os mecanismos de solidificação de ligas metálicas, já que estes conceitos serão necessários para a compreensão do trabalho. O estudo da solidificação de ligas metálicas é deveras importante na medida em que grande parte dos componentes metálicos, indispensáveis na sociedade atual, é vazada numa forma acabada ou pré-acabada [6]. O processo de solidificação pode ser dividido em duas fases igualmente importantes – o processo de nucleação e o processo de crescimento de grão [6, 7].

Assim, quando uma liga metálica é arrefecida abaixo da sua temperatura de líquido, começam a formar-se pequenas partículas sólidas (núcleos) no banho líquido. Caso o núcleo se forme sem o auxílio de impurezas, denomina-se nucleação homogênea. Neste caso, o grau de sobreaquecimento necessário para a formação dos núcleos pode ser da ordem de algumas centenas de graus celsius [6]. Para que um núcleo formado por nucleação homogênea cresça e origine um grão, tem que atingir um determinado tamanho de não retorno, denominado raio crítico ( $r^*$ ), o qual depende do material em questão e do nível de sobreaquecimento. À temperatura de fusão o raio crítico será infinito [5], [6]. Na Figura 2.1 está representada a variação da energia livre de nucleação em função do raio crítico.

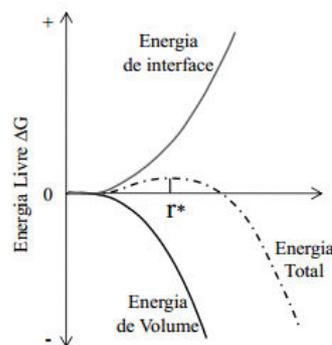


Figura 2.1 – Variação do raio crítico. (Adaptado de [8])

Quando a nucleação ocorre junto às paredes da moldação ou é promovida por impurezas presentes no banho metálico (agente nucleante), denomina-se nucleação heterogênea. Este tipo de nucleação ocorre mais facilmente e requer um nível de sobreaquecimento menor, pois, devido à existência de agentes nucleantes, a energia necessária para se formar um núcleo estável é mais baixa do que se o núcleo se formar no líquido puro [6]. Em qualquer dos casos, depois da formação de núcleos estáveis, dá-se o crescimento de grão, cuja forma e tamanho vai depender das condições de aquecimento e do número de nucleações na vizinhança.

## ***2.2.Squeeze Casting***

Historicamente, a fundição é um dos mais antigos processos de fabrico ainda hoje utilizados pela humanidade, havendo registos de peças de joalheria Egípcia em ouro com mais de 5000 anos, fabricadas por processos de fundição. No entanto, as primeiras referências aos princípios que regem o processo *Squeeze Casting* são encontradas em literatura Russa datada de 1878, onde é sugerido que o metal líquido deve ser pressionado durante a solidificação [9]. Demorou mais de 70 anos até que as aplicações comerciais de produtos obtidos por *Squeeze Casting* começassem a surgir, o que ocorreu na década de 60 na Europa, EUA e Japão. O processo define-se como uma combinação das tecnologias da fundição e do forjamento, na qual o metal líquido adquire a forma da cavidade (moldação), solidificando sob pressão. Do pressuposto original evoluíram duas vertentes distintas do *Squeeze Casting*: o direto e o indireto, conforme apresentado na Figura 2.2 [9, 10].

O *Squeeze Casting* direto (Figura 2.2a) é um processo segundo o qual o metal solidifica sob ação de pressão aplicada em toda a superfície do componente. Esta característica leva a um aumento da transferência de calor, provocando afinação de grão, para além da eliminação de porosidades e rechupes. Outra das vantagens desta técnica é a não necessidade de sistemas de alimentação e gítagem, tornando o processo muito eficiente na utilização de material. Pela mesma razão, é essencial um sistema de medição do volume do metal a vazar muito eficaz, pois a quantidade de metal vazado vai definir as dimensões finais do componente. Assim, se a variação do sistema de vazamento for superior à variação do toleranciamento dimensional aceitável, vai dar origem a percentagens de sucata elevadas. Para além deste inconveniente, a introdução de óxidos superficiais no fundido e a solidificação prematura, que advêm do tempo entre o vazamento do material e a descida do punção, conduziram à aplicação do *Squeeze Casting* indireto [9, 10].

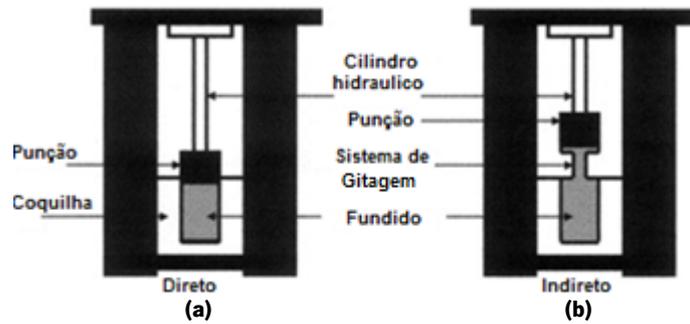


Figura 2.2 – Esquema simplificado das diferenças entre *Squeeze Casting*: a – Direto; b – Indireto. (Adaptado de [10]).

O *Squeeze Casting* indireto (Figura 2.2b) apresenta uma configuração diferente. Nesta variante do processo, o metal líquido é injetado verticalmente por um pistão de diâmetro reduzido, através da parte inferior da cavidade moldante, sendo que o mecanismo de injeção é também responsável pela aplicação da pressão durante a solidificação. As vantagens desta variante são ligeiramente diferentes da anterior – *Squeeze Casting* direto. Embora não se verifique um aumento tão considerável da taxa de transferência de calor, mantêm-se as melhorias na redução de porosidades e rechupes. O nível de aproveitamento do material é menor, pois existe a necessidade de um sistema de gitagem. No entanto, são reduzidos os problemas relativos à inclusão de óxidos superficiais e à solidificação prematura. Devido a um maior controlo do enchimento, é possível a produção de componentes mais complexos do que no *Squeeze Casting* direto [9, 10, 11]. A variante do processo *Squeeze Casting* indireto apresenta diferentes tipos de aperto, conforme representado na Figura 2.3. A grande desvantagem desta tecnologia advém do alto custo aquisição e manutenção dos equipamentos, devido às altas pressões envolvidas no processo.

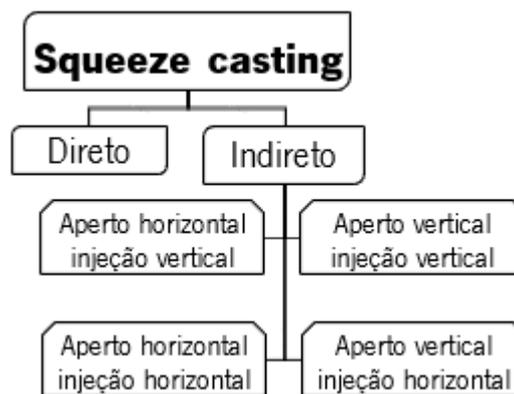


Figura 2.3 – Tipos de *Squeeze Casting*.

### 2.2.1. Ligas utilizáveis no processo *Squeeze Casting*

No *Squeeze Casting* são principalmente usadas ligas de baixo ponto de fusão como as ligas de alumínio ou de magnésio, o que se deve sobretudo a limitações térmicas decorrentes do material das

coquilhas. Ainda assim, existem referências ao uso de *Squeeze Casting* com ligas de mais alto ponto de fusão como ligas de cobre, ferros fundidos e aços [10]. O processo é também utilizado no fabrico com metais de matriz compósita, na medida em que, permitindo a completa eliminação das porosidades, torna viável o reforço de zonas críticas dos componentes [12].

### 2.2.2. Evolução do *Squeeze Casting*

A Figura 2.4 ilustra a evolução do *Squeeze Casting*. Inicialmente, foram desenvolvidos sistemas de *Squeeze Casting* direto para a produção de componentes simples e simétricos, num processo muito semelhante ao forjamento. Posteriormente, surgiram sistemas que possibilitavam o movimento do metal, permitindo assim a produção de componentes mais complexos. O aparecimento do *Squeeze Casting* indireto potenciou o aumento da complexidade dos componentes produzidos devido ao controlo dos parâmetros de enchimento. Foram desenvolvidas ligas com características adaptadas ao *Squeeze Casting*, como por exemplo, a liga Al12Si0.7CuMg [10]. A evolução desta tecnologia dá-se com a sua utilização no fabrico de componentes com matriz compósita e com a viabilidade do processo para o fabrico de metais semi-sólidos [9, 13].

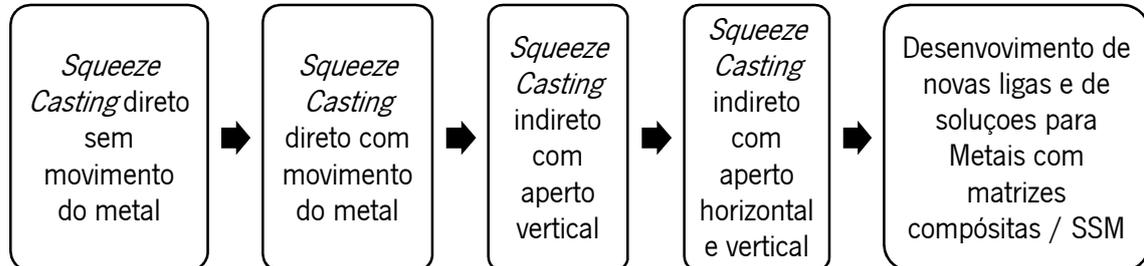


Figura 2.4 – Evolução do *Squeeze Casting*.

### 2.2.3. Semi-Solid Casting

As características intrínsecas ao processo de *Squeeze Casting* tornam possível a sua utilização na obtenção de componentes no âmbito dos metais no estado semi-sólido. Esta área foi fundada por M.C. Flemings durante estudos na área da reologia dos metais, nos quais se descobriu as propriedades de tixotropia nos metais semi-sólidos [13]. Entende-se por tixotropia a propriedade que define a alteração de viscosidade de um material quando sujeito a tensões de corte [14]. Estudos preliminares no MIT demonstraram que a viscosidade de ligas semi-sólidas variava de acordo com o nível de deformação a que estão sujeitas, com a fração de líquidos presente na liga e com o tempo de ciclo. Estas variações vão desde ligas com centenas de *poise* – “consistência da manteiga”,

quando em repouso, até cinquenta *poise* – consistência de óleo comum, quando agitadas “vigorosamente” [12].

Vários benefícios resultaram da invenção de processos inspirados nestas descobertas. Primeiramente, e de um modo particular para ligas de alto ponto de fusão, estes processos permitem a redução das temperaturas de operação. Em segundo lugar, o escoamento de um material mais viscoso dá origem a um enchimento das cavidades em regimes mais laminares, comparativamente ao vazamento de ligas no estado totalmente líquido, com todos os benefícios que isso acarreta, nomeadamente, a redução do aprisionamento de gases e a redução da contração volumétrica que dependerá da fração de sólidos no meio. Para além dos benefícios relacionados com a tixotropia, os processos evoluíram no sentido de controlar as microestruturas resultantes. Assim, é demonstrado que estes processos permitem obter microestruturas globulares equiaxiais ou em forma de roseta, por nucleação forçada através de processos de afinção, sobrearrefecimento e homogeneização ou por fragmentação dendrítica provocada pela agitação mecânica ou magneto-hidrodinâmica [11, 15, 13]. Como foi referido anteriormente, múltiplos processos surgiram a partir das descobertas de Flemings, entre eles o *Rheocasting* e *Thixocasting*, brevemente descritos de seguida.

O processo de *Thixocasting* é normalmente dividido em 3 fases - preparação dos lingotes (1), reaquecimento (2) e formação da peça final (3), conforme apresentado na Figura 2.5. Múltiplos métodos de pré-tratamento dos lingotes foram desenvolvidos, tais como os supracitados [11]. A fase de reaquecimento (2) implica o controlo rigoroso dos parâmetros de processamento, de modo a garantir a correta fração de sólidos e a homogeneidade da temperatura no material no momento do “carregamento”. Posteriormente, o material é “carregado” no equipamento de formação (por exemplo, um equipamento de *Squeeze Casting*) onde a peça final é produzida [13].



**Figura 2.5 – Etapas do processo de *Thixocasting*. (Adaptado de [11])**

Contrariamente ao processo anterior, os processos de *Rheocasting* integram a fase de pré-preparação dos materiais base com as fases subsequentes, sendo os materiais preparados num recipiente onde é possível controlar as condições de solidificação. Um destes processos é o *New Rheocasting*, cuja invenção teve grande impacto no universo dos metais semi-sólidos. Neste, a

formação de microestruturas globulares não se dá por agitação do banho metálico, mas sim por nucleação heterogênea do banho. Depois da formação da microestrutura desejada, o material é novamente aquecido até ao estado semi-sólido, sendo posteriormente carregado num equipamento para dar forma ao produto final. É nesta fase (2) que a tecnologia de *Squeeze Casting* pode entrar no processo [13]. Na Figura 2.6 estão representadas as etapas do *New Rheocasting*:

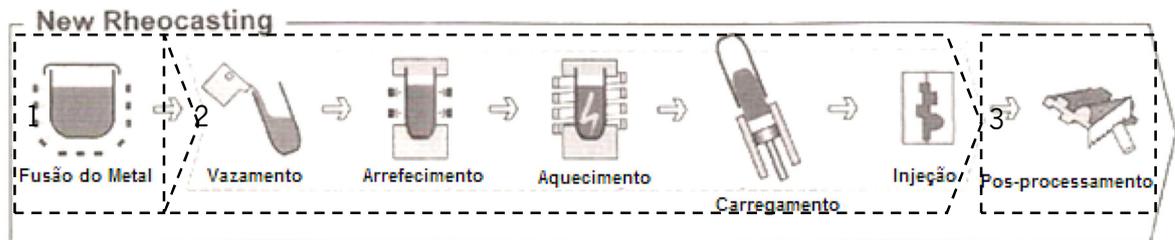


Figura 2.6 – Etapas do processo *New Rheocasting*. (Adaptado de [11])

#### 2.2.4. Parâmetros do processo *Squeeze Casting*

**Volume de metal líquido** – conforme já referido, o controlo do volume de material vazado é essencial no processo *Squeeze Casting* direto, pois volume em excesso afeta o controlo dimensional dos componentes. No caso do processo *Squeeze Casting* indireto, devido à existência de sistema de gitagem, esse controlo não é tão vital [10, 16].

**Temperatura de vazamento** – a temperatura de vazamento vai afetar a qualidade do componente e a vida da coquilha. Temperatura demasiado elevada diminui a esperança de vida da coquilha e aumenta a probabilidade de intrusões de óxidos no banho. Por outro lado, temperatura demasiado baixa promove solidificações prematuras e dificulta o enchimento em zonas finas. É comum na literatura encontrarem-se valores de temperatura de vazamento para o *Squeeze Casting* entre 6 a 55°C acima da temperatura de líquidos da liga a vazar. Estes valores são representativos para o processo de *Squeeze Casting* puro, sendo que quando o conceito é usado em auxílio a processos de metais semi-sólidos, as temperaturas são relativamente mais baixas [9, 12].

**Temperatura da coquilha** – de acordo com a literatura são comuns temperaturas da coquilha entre os 200 e 400°C; no caso particular das ligas de alumínio são indicadas temperaturas entre 200 e 300°C. A temperatura do punção deve ser ligeiramente inferior, 15 a 30°C, para evitar a colagem e arrefecimentos prematuros [12].

**Pressão aplicada** – O nível de pressão a exercer depende da geometria do componente e das características mecânicas desejadas. No entanto, existe um nível de pressão ótimo a partir do

qual aumentos da pressão não se refletem em melhorias das características mecânicas dos componentes. A literatura sugere valores entre 30 e 140 MPa como referência para este processo [10, 11, 12].

**Duração da pressão** – A pressão deve ser aplicada durante todo o período de solidificação do componente. Conseqüentemente, componentes de maiores dimensões serão sujeitos a períodos de pressão superiores. Contudo, encontram-se referenciados valores entre 30 e 120s de pressão. Após a solidificação, a manutenção da pressão apenas se reflete no aumento do tempo de ciclo, não trazendo qualquer benefício ao componente [11, 17].

**Lubrificação** – É indicado o uso de lubrificantes antes do vazamento para facilitar a operação de desmoldação. No caso da fundição das ligas leves (alumínio, cobre, magnésio, etc.) são recomendados lubrificantes de grafite coloidal [12].

### **2.2.5. Defeitos característicos do *Squeeze Casting***

Tal como todos os processos de fabrico, o *Squeeze Casting* apresenta problemas característicos, embora a otimização paramétrica efetuada para cada geometria permita reduzir a sua incidência. Em seguida, apresenta-se uma pequena lista dos principais defeitos típicos do *Squeeze Casting*, bem como algumas explicações sobre o seu aparecimento e possíveis soluções baseadas, no livro “*Casting*” da coleção *ASM* [12], sendo as mais comuns a inclusão de óxidos os cold laps e o hot tearing.

**Inclusão de óxidos** – deve-se principalmente a falhas na manutenção da limpeza dos sistemas de manuseamento do metal líquido. A introdução de sistemas de filtragem pode prevenir este problema.

**Porosidades e rechupes** – resultam da aplicação de pressão insuficiente durante a fase de solidificação do metal ou do deficiente projeto da moldação. Normalmente, é indicada a pressão de 50MPa para eliminação completa de porosidades.

**Segregações** – existem várias formas de segregação possíveis, sendo que algumas destas provocam alterações localizadas das propriedades mecânicas, entre outras. Podem ser evitadas pelo aumento da temperatura de vazamento, pelo aperfeiçoamento do tempo de ciclo ou pela mudança da liga usada.

**Cold laps** – refere-se à solidificação sobre camadas já solidificadas, causando deficiente agregação entre as duas camadas. Pode ser evitado com o aumento da temperatura de vazamento ou com aperfeiçoamentos no tempo de ciclo.

**Hot tearing** – As fissuras ocorrem quando as fases líquida e sólida coexistem num espectro amplo de temperaturas. A contração da parte sólida junto às paredes da moldação causa solicitações nas partes ainda em solidificação, podendo causar fissuras. Pode ser evitada através da diminuição da temperatura de vazamento, aumentando o tempo de pressão, entre outros.

### 2.2.6. Microestruturas características de *Squeeze Casting*

É noção transversal a todos os trabalhos em *Squeeze Casting* que o processo assegura características mecânicas superiores aos métodos de fundição convencionais devido à formação de estruturas finas e densas, e sobretudo devido à eliminação das porosidades e rechupes [10]. A aplicação de pressão durante a solidificação conduz a um aumento do coeficiente de transferência de calor conjugado com um aumento da temperatura de solidificação, traduzido pela equação de *Clausius-Clapeyron* (2.1). A conjugação destes dois fatores tem como consequência a formação de estruturas finas [10]. A equação de *Clausius-Clapeyron* estabelece o aumento da temperatura de líquidos de um determinado material com o aumento da pressão.

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T_f(V_l - V_s)}{L_f}, \quad (2.1)$$

Em que T – Temperatura, P – Pressão,  $T_f$  – Temperatura de sólidos,  $V_l$  – Volume específico de líquidos,  $V_s$  – Volume específico de sólidos e  $L_f$  – Calor latente de solidificação.

Existem estudos que analisaram este efeito, tendo chegado à conclusão que para o alumínio puro, a temperatura de líquidos sobe 6°C por cada 100MPa de pressão [9]. O nível de pressão a partir do qual as porosidades e rechupes são completamente eliminados é menos consensual. Alguns autores indicam o valor de 50 MPa, enquanto outros indicam valores na ordem dos 100 MPa [9, 17]. É consensual que o processo potencia o crescimento e a incidência das estruturas dendríticas. Este fenómeno ocorre devido ao aumento da taxa de arrefecimento resultante da aplicação de pressão durante a solidificação, como foi referido anteriormente [18]. Relativamente às partículas de silício eutético, a literatura menciona que neste processo a sua forma habitual é fibrosa [10].

Estudos sobre a evolução da dureza com os parâmetros do processo são menos comuns; no entanto, foi verificado por Maleki *et al.* [19] que a dureza de ligas de alumínio aumenta com o aumento da pressão aplicada. Na Figura 2.7 está representada a microestrutura de um componente da liga AlSi7 obtido por *Squeeze Casting* direto, com a pressão aplicada de 150MPa.

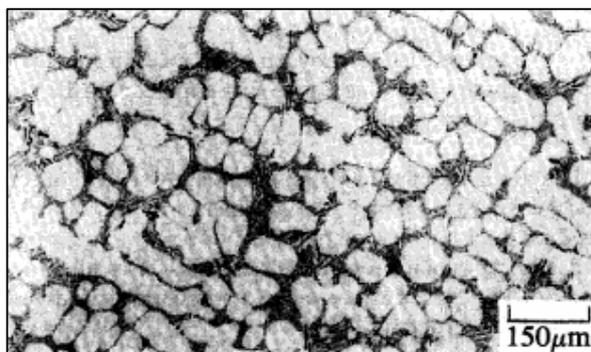


Figura 2.7 – Microestrutura de AlSi7, por *Squeeze Casting* direto com 150 MPa. (Adaptado de [9])

## 2.3.Tratamento Acústico de Metal Líquido

O tratamento ultrassônico do metal líquido surge da ideia da solidificação dinâmica sugerida por Chernov que, para além desta, sugeriu como alternativas a vibração mecânica e eletromagnética [20]. As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas cuja frequência se situa entre 16 kHz e 1 GHz, e provocam efeitos muito interessantes no banho metálico como, por exemplo, a cavitação e a homogeneização.

### 2.3.1.Tecnologia MMM (Multifrequência, Multimodo, Modulada)

O gerador de ondas ultrassônicas utilizado neste projeto baseia-se na tecnologia MMM – Multifrequência, Multimodo, Modulada, patenteada pela empresa *MPInterconsulting*. Através de um processamento avançado de sinal digital, a tecnologia permite sincronizar os modos de vibração dos diferentes componentes durante a excitação acústica. Obtém-se assim uma distribuição acústica uniforme, homogênea e de elevada intensidade [8, 21].

Segundo Puga [8], esta tecnologia promove condições de vibração dinâmica, dando origem a cavitação acústica uniforme e bem distribuída. Deste modo, os efeitos da desgaseificação e afinção de metal líquido podem ser melhorados e acelerados [8]. A tecnologia funciona como um sistema recíproco, onde um sensor acústico permite o *feedback* entre o gerador de ondas ultrassônicas e o meio físico, otimizando continuamente o sinal de acordo com o meio de transmissão. A reciprocidade é visível na

Figura 2.8, na qual estão representados os vários componentes do sistema utilizado: gerador de ultrassons (A), responsável pelos parâmetros de regulação e controlo; conversor de potência acústica (B); *waveguide* (C); elemento de ligação ou carga acústica (D) que pode ser um radiador acústico e/ou um meio físico; o sensor (E), que fornece *feedback* ao gerador de ultrassons.

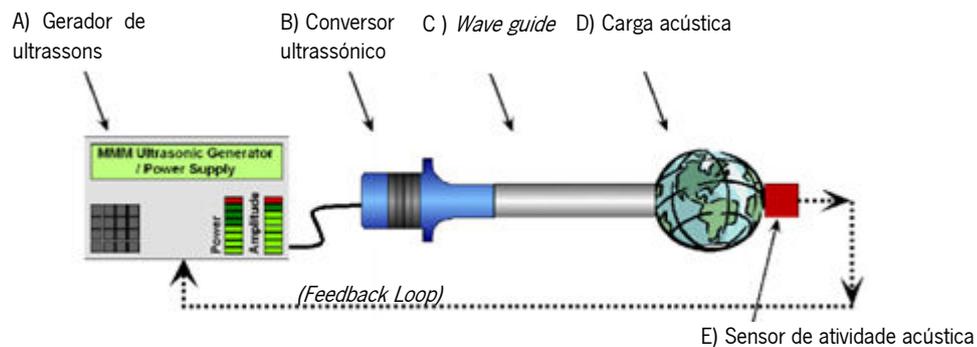


Figura 2.8 – Sistema de ultrassons baseado na tecnologia MMM. (Adaptado de [21])

### 2.3.1. Métodos de aplicação da energia acústica ao banho metálico

A forma de aplicação da energia acústica vai influenciar largamente os resultados obtidos. Esta pode ser aplicada de duas formas – diretamente no banho metálico por um difusor acústico ou indiretamente, através da coquilha. Jian em [7] resumiu os métodos de aplicação de energia acústica a banhos metálicos, conforme representado na Tabela 2.2.

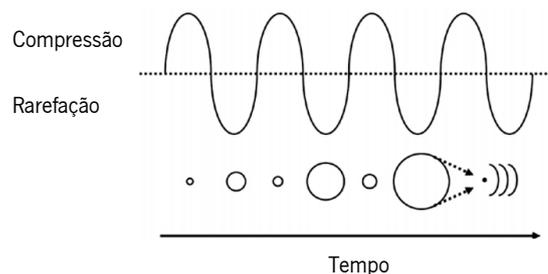
Tabela 2.2 – Classificação dos métodos de aplicação da energia acústica. (Adaptado de [7])

	Vibração da Coquilha	Vibração do banho simples	Vibração do banho com difusor simples (pré/pós vazamento)	Vibração do banho com difusor arrefecido (pré/pós vazamento)
Vibração vertical				
Vibração Horizontal				
Vibração Rotacional		-		

### 2.3.2. Efeitos acústicos no banho metálico e parâmetros importantes

O tratamento acústico de metal líquido compreende a estimulação do meio por uma onda acústica de frequência ultrassônica (16 kHz – 1 GHz). Durante o tratamento, o meio é submetido a ondas que o sujeitam a esforços periódicos de compressão e expansão. Estes esforços provocam efeitos no seio do meio líquido, nomeadamente, cavitação e fluxos acústicos.

A cavitação é o fenómeno acústico mais relevante para o tratamento de metal líquido. Este fenómeno ocorre quando a pressão acústica ultrapassa um certo limite, bastante elevado num banho homogéneo, mas atingível na prática devido à presença de partículas não solúveis [8]. As bolhas formadas sofrem expansões e compressões sucessivas, aumentando de volume até colapsarem sob a compressão da onda acústica, dando origem a ondas de choque de elevada intensidade, que podem provocar sobrearrefecimentos localizados e fragmentação dendrítica [3, 7, 8]. Na Figura 2.9 está representado o ciclo de formação de uma bolha pelo efeito de cavitação no seio de um qualquer meio líquido.



**Figura 2.9 – Cavitação acústica. (Adaptado de [3])**

A intensidade acústica ( $I$ ) e a atenuação das ondas acústicas são parâmetros importantes a controlar já que a sua variação tem consequências no sucesso do tratamento ultrassónico de banhos de metal líquido. A primeira é o coeficiente entre o fluxo de potência e a área projetada de radiação e é o parâmetro de maior relevância na caracterização de um campo ultrassónico, conforme a equação (2.2). A segunda define-se pelo decréscimo da intensidade durante a propagação e depende da distância à fonte de vibração e da geometria da cavidade que contém o líquido a excitar [8].

$$I = \frac{P}{S} \left( \frac{W}{cm^2} \right) \quad (2.2)$$

Em que  $P$  é a potência acústica e  $S$  é a área projetada de radiação.

A cavitação num banho metálico tem como principais consequências a desgaseificação, afinação da matriz  $\alpha$ -Al e modificação do silício eutético. Estes fenómenos são centrais no projeto, sendo explicados de seguida.

A desgaseificação acústica em ligas de alumínio apresenta-se como alternativa aos métodos tradicionais de desgaseificação. A cavitação acústica intensifica os processos de transferência de massa e acelera o processo de difusão do hidrogénio do banho metálico para as bolhas formadas. Tal como na desgaseificação por introdução de gás inerte, o hidrogénio atómico difunde para as bolhas formadas, sendo depois removido para a atmosfera com a emergência das bolhas à superfície [22, 23].

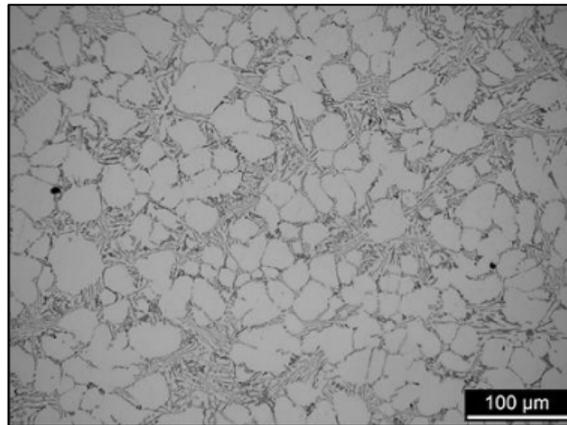
O processo de afinação de matriz  $\alpha$ -Al tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas das ligas de alumínio pela redução do tamanho médio de grão e por limitar a formação de estruturas dendríticas, comuns nas ligas de alumínio. A afinação de grão ocorre por nucleação heterogénea do alumínio (fase  $\alpha$ -Al) [24]. Para além do efeito dos agentes afinadores na alteração da morfologia de grão, esta também depende da velocidade de arrefecimento do metal [25].

A afinação de grão por vibração acústica é um fenómeno bastante estudado, o qual ocorre devido à cavitação que, por sua vez, promove a nucleação heterogénea e a fragmentação dendrítica. A promoção da nucleação heterogénea por cavitação acústica é explicada por mais que uma teoria. A primeira teoria postula que pela expansão das bolhas de cavitação ocorre um sobrearrefecimento localizado à superfície da bolha, que se traduz num aumento da probabilidade de ocorrência de nucleação. Uma outra teoria defende que o aumento da pressão localizada nos pontos onde colapsam as bolhas de cavitação acústica leva a um aumento da temperatura de fusão da liga e conseqüente sobrearrefecimento localizado [3]. A fragmentação dendrítica pode ocorrer de duas formas distintas. Esta pode suceder devido às ondas de choque que têm origem no colapso das bolhas de cavitação, partindo as dendrites formadas no início da fase sólida. Por outro lado, pode ocorrer a fusão das dendrites secundárias na zona da raiz, devido ao aumento de pressão provocado pelo colapso das bolhas de cavitação [8].

A microestrutura de uma liga metálica depende de múltiplos fatores. A composição química da liga, o processo de fundição e a velocidade de arrefecimento são alguns desses fatores capazes de alterar a morfologia da estrutura das ligas de alumínio. A operação de modificação tem o intuito de

alterar a forma do silício eutético de uma morfologia acicular para fibrosa [25, 26]. De facto, de acordo com alguns estudos, a introdução de energia acústica no banho metálico tende a promover uma alteração na morfologia da fase do Si, sendo esta indicadora da existência de um mecanismo de modificação acústica. Jian [7] refere num desses trabalhos que a existência de nucleação de silício eutético nos espaços interdendríticos, bem como a sua morfologia fibrosa em forma de “roseta” são um indicador da ocorrência de modificação. Contudo, a modificação do Si eutético pelo processo acústico carece ainda de explicação, sendo necessária mais investigação, de forma a definir o mecanismo responsável pela modificação.

Como resultado destes fenómenos, as amostras processadas por tratamento acústico apresentam estruturas afinadas, modificadas e homogéneas, como é possível observar na Figura 2.10.



**Figura 2.10 – Microestrutura característica de uma liga AlSi9Cu3 processada isotermicamente por ultrassons à temperatura de 615°C. (Adaptado de [8])**

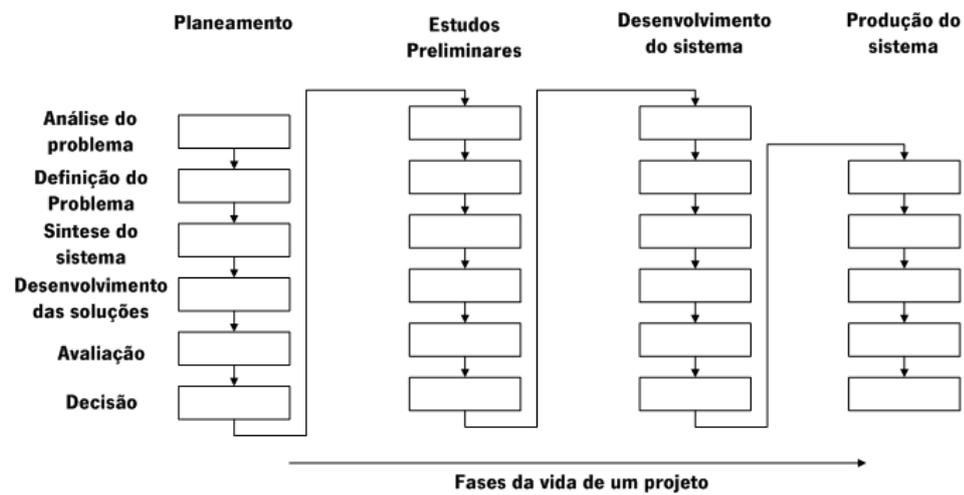
## 2.4. Projeto na Engenharia Mecânica

Desde o fabrico das primeiras ferramentas pelo homem primitivo até à complexa sociedade de consumo atual, o ser humano tem desenvolvido projetos mecânicos de maior ou menor complexidade. Daí, não é de estranhar que existam tantas definições de projeto como formas de os concretizar. Importa por isso definir este conceito – segundo o Dicionário da Língua Portuguesa da Porto Editora [14], um projeto é um “plano para a realização de um ato, uma representação gráfica e escrita, acompanhada de um orçamento que torne viável a realização de uma obra”. Esta definição é consonante com o que diz o PMI – Instituto de Gestão de Projeto (USA), responsável pelo conhecido *PMBok*, que define projeto como um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo [27]. Pode-se concluir que um projeto é temporário, único em certos aspetos, tem objetivos específicos, é causa e meio de mudança, envolve risco e incerteza e envolve o esforço humano, material e financeiro [28].

O aumento da complexidade dos projetos a desenvolver levou ao surgimento da ciência de gestão de projetos e do estudo das metodologias de projeto. O projeto *Manhattan* é considerado por muitos como o ponto inicial das disciplinas de gestão de projetos modernas, sendo que muitas das ferramentas hoje utilizadas foram aí desenvolvidas. Desde então surgiram modelos que procuram concetualizar o desenvolvimento de um projeto, os quais podem ser divididos em duas categorias. Os primeiros – modelos descritivos – descrevem a sequência das atividades, estratégias e métodos usuais num projeto. Por outro lado, os modelos prescritivos ditam o modelo de atividades mais apropriado para um projeto, providenciando procedimentos sistemáticos, considerados como ferramentas de metodologias de projeto [30, 31]. Foram desenvolvidos trabalhos consideráveis com o intuito de racionalizar e sistematizar o processo de desenvolvimento dos projetos, nomeadamente na Alemanha pelo organismo “*Verein Deutscher Ingenieure*” (VDI) responsável pela produção de uma série de documentos neste ramo, entre eles a norma VDI 2221.

A norma VDI 2221 [31] define princípios válidos para abordagens sistemáticas a projetos em diferentes áreas. Segundo a norma, o projeto resume-se a um sistema para a resolução de problemas, que poderá ser sistematizado e dividido em fases, conforme ilustrado na Figura 2.11. De uma forma muito generalista, a divisão sugerida é a seguinte: (1) Análise do problema; (2) Definição do problema; (3) Síntese do sistema; (4) Análise do sistema; (5) Avaliação e tomada de decisão. Embora na VDI

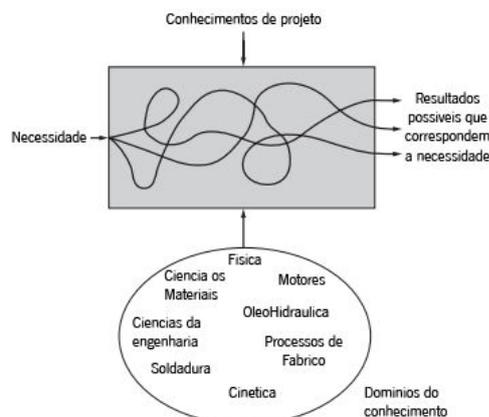
2221 existam também outros modelos mais exaustivos, o modelo presente na Figura 2.11 representa melhor o modelo de projeto seguido.



**Figura 2.11 – Fases da resolução de um projeto. (Adaptado de [31])**

Todo o projeto de engenharia tem na sua génese uma necessidade, da qual resulta um problema cuja resolução é o ponto fulcral do projeto. No caso particular da engenharia mecânica, muitas vezes essa necessidade é correspondente ao desenvolvimento de um novo produto.

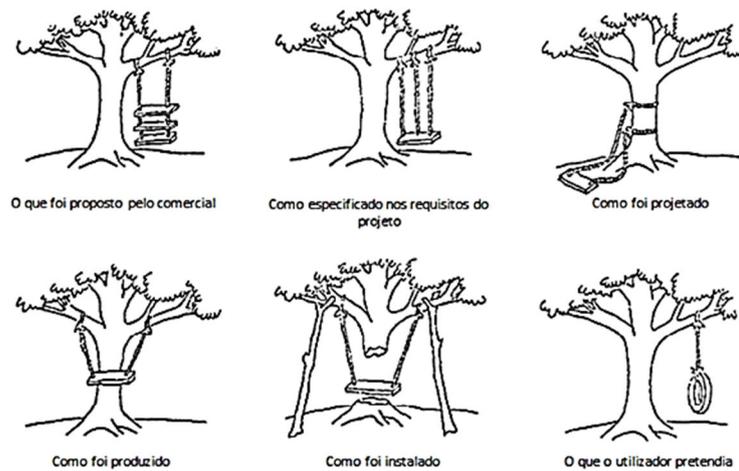
Todas estas fases são meramente indicativas e o resultado final vai depender sempre do trabalho realizado em cada uma das fases, podendo duas equipas com o mesmo objetivo e o mesmo método alcançar resultados diferentes. A Figura 2.12 representa bem esta realidade. Mesmo assim, existem inúmeras razões para a sistematização dos projetos. Entre estas estão a complexidade exigida ao trabalho de projeto, a necessidade de equipas interdisciplinares, a associação do trabalho de projeto a riscos e custos elevados, e a necessidade do aumento da eficiência dos trabalhos em geral [30].



**Figura 2.12 – Design process. (Adaptado de [32])**

### 2.4.1.Requisitos e especificações

A primeira etapa de qualquer projeto é a identificação do problema a resolver. Este é o ponto mais crítico no processo, pois define e restringe todo o processo a jusante. Na Figura 2.13 estão representadas as dificuldades que uma ineficiente ação nesta fase causa nas restantes fases do projeto.



**Figura 2.13 – Dificuldades causadas por ineficiência na fase de especificações. (Adaptado de [33])**

Resumindo, nesta fase é necessário definir e clarificar o que o cliente pretende, reunindo assim informação suficiente que torne possível responder eficazmente ao pedido e, desse modo, alcançar a satisfação do cliente. A. Kano [33] desenvolveu um diagrama que relaciona a satisfação dos clientes com a performance dos realizadores do projeto. Alguns autores relatam ainda que os requisitos se dividem em quatro níveis – requisitos esperados, comunicados, não comunicados e excitadores. A tarefa de definição dos requisitos dos clientes consiste numa tradução de necessidades vagas (ideias qualitativas) em grandezas quantificáveis e determinação das funções desejadas.

### 2.4.2.Projeto concetual

O projeto concetual tem como foco o desenvolvimento de soluções para a função a cumprir, solução essa que, caso seja aprovada, será desenvolvida em pormenor na fase seguinte [32]. É prática comum o desenvolvimento concetual individual para cada subfunção do sistema, sendo a solução final a combinação das várias subfunções [34]. O termo “conceito” refere-se a uma ideia com potencial para resolver o projeto e suficientemente desenvolvida para ser avaliada e comparada. O objetivo de um projeto é satisfazer uma necessidade, pelo que a geração de conceitos que o permitam é essencial para o sucesso do mesmo. Alguns conceitos são naturalmente gerados, o que se deve à

tendência natural dos engenheiros para ligar as especificações a algo familiar, dentro da sua área de especialização – “inércia mental”. Na realidade, a criatividade é central nesta fase; existem vários métodos para estimular o pensamento criativo, removendo bloqueios mentais e alargando o espectro de procura de solução. O *brainstorming*, o *design* axiomático e a teoria de resolução de problemas inventivos – TRIZ são alguns exemplos [30].

#### **2.4.2.1. Instrumentos criativos**

Instrumentos criativos são métodos usados para estimular a criatividade e desbloquear o pensamento criativo, permitindo assim ultrapassar a inércia mental dos projetistas. Em seguida, serão apresentados e analisados alguns métodos.

***Brainstorming*** – É o método criativo mais conhecido e assume-se como uma técnica de desenvolvimento de ideias em grupo, pensada para potenciar a capacidade criativa de cada elemento. O princípio deste método é o de que uma ideia formulada por alguém gera nos outros uma ideia similar, antagónica, deformada ou concorrente. A PMI define este método como uma técnica de coleta de dados e criatividade, usada para identificar riscos, ideias ou soluções em grupo [27]. O objetivo das sessões de *brainstorming* é produzir o maior número de ideias possível sobre um dado assunto, sendo sobretudo eficaz na solução de problemas concretos formulados em termos de “Como...”.

Este método deve ser utilizado em grupo, sem qualquer hierarquia para além do coordenador. Nenhuma ideia deve ser criticada ou precocemente descartada pelo próprio, pois essa ideia pode ser geradora de um conceito eficaz. Uma maneira de prevenir o criticismo não construtivo é impedir a discussão das ideias durante a sessão, permitindo assim a maturação das mesmas. O método *brainstorming* foi o principal método de auxílio criativo utilizado neste projeto. Ainda assim, é interessante descrever outros métodos existentes, nomeadamente, a teoria da resolução de problemas inventivos.

**TRIZ - Teoria da Resolução de Problemas Inventivos** – O acrónimo TRIZ vem do russo *Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch*, que se traduz por teoria da resolução de problemas inventivos. Foi criada por G.S Altshuller na extinta União Soviética, com base na análise sistemática de patentes. Altshuller descobriu padrões de soluções para problemas semelhantes em patentes distintas. A TRIZ baseia-se em duas ideias-chave para a resolução dos problemas inventivos – muitos dos problemas que os engenheiros enfrentam já foram resolvidos por outras indústrias, muitas vezes

pelo uso de tecnologia diferente, e que existem padrões de evolução da tecnologia que podem ser usados para prever a evolução de uma determinada tecnologia [32, 35]. O autor desenvolveu um sistema científico e padronizado para a resolução de problemas inventivos, que contempla trinta e nove parâmetros de engenharia, a matriz de contradições e quarenta princípios inventivos. Com a sua pesquisa, Atlshuller descobriu intervalos regulares na evolução dos sistemas de engenharia e descreveu esses fenómenos em oito leis, que reconhecem e predizem potenciais desenvolvimentos para uma determinada tecnologia. Foi também criada uma escala que categoriza as patentes de acordo com o seu nível de “inventividade”. A TRIZ baseia-se nos conceitos de idealidade e contradições, tendo um vasto leque de ferramentas para ajudar ao aumento da criatividade e desbloqueio mental[36].

No processo de desenvolvimento concetual de um produto, esta teoria é muito útil, pois sistematiza o desenvolvimento e indica potenciais caminhos de evolução dos produtos.

**Outros métodos criativos** – Para além dos métodos apresentados, existem muitos outros métodos de auxílio ao processo criativo durante a fase concetual de um projeto. Métodos como *design* axiomático, abordagens algorítmicas e a biomimética foram desenvolvidos e são aplicados no desenvolvimento concetual de produtos [28, 37].

### **2.4.3.Segurança em máquinas industriais**

As legislações Portuguesa e Europeia apresentam normas quanto à redução de riscos e segurança das máquinas industriais. A Diretiva Máquina 2006/42/CE teve como objetivo reduzir o custo social decorrente do número de acidentes provocados pela utilização de máquinas. Da análise do documento surgem dois riscos a mitigar no desenvolvimento do equipamento deste projeto, sendo eles o risco de sujeição a temperaturas extremas e o risco de aprisionamento numa máquina. De seguida, são apresentadas as recomendações da norma para a atenuação desses riscos [38].

**Riscos devido a temperaturas extremas** – “Devem ser tomadas disposições para evitar qualquer risco de ferimentos, decorrentes do contacto ou da proximidade, com elementos da máquina ou materiais a temperatura elevada ou muito baixa. Devem também ser tomadas as medidas necessárias para evitar os riscos de projeção e matérias quentes ou muito frias ou para garantir a proteção contra esses riscos.”

**Riscos de aprisionamento numa máquina** – “A máquina deve ser concebida, fabricada ou equipada com meios que permitam evitar que qualquer pessoa fique nela encarcerada, ou, se tal não for possível, que permitam pedir ajuda” [38].



## **CAPÍTULO 3. PROJETO DE UM EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE *SQUEEZE CASTING***

### **3.1. Projeto Concetual**

#### **3.1.1. Apresentação do problema**

Na primeira parte desta dissertação foram apresentados factos sobre duas tecnologias distintas – *Squeeze Casting* e o tratamento acústico de metal líquido. A união destas duas tecnologias é promissora e potencialmente revolucionária, na medida em que, teoricamente, possibilita a produção de componentes complexos, livres de porosidades e com microestruturas afinadas e modificadas.

A construção de um equipamento de *Squeeze Casting* assistido por ultrassons era o objetivo desta dissertação. Neste capítulo irão ser apresentados os problemas a resolver, bem como todos os passos da sua resolução, do conceito ao detalhe. Tal como representado na Figura 2.3 e na Tabela 2.2 (das secções 2.2 e 2.3, respetivamente), existem diversas modalidades de *Squeeze Casting* e múltiplas formas de aplicação da energia acústica ao banho metálico. Serão analisadas as diferentes combinações possíveis, das quais uma será selecionada e desenvolvida.

### 3.1.2. Condições de sistema

Conforme descrito anteriormente as maneiras de excitar acusticamente banhos metálicos resumem-se a três: vibração da coquilha, vibração simples do banho ou vibração do banho com recurso a difusor acústico. Na conjugação com o *squeeze casting*, estas opções reduzem-se à excitação direta do banho pré-vazamento ou à excitação da coquilha durante o vazamento.

Para o caso da excitação direta do banho pré-vazamento, qualquer uma das opções descritas de *Squeeze Casting* é funcional. Usando a vibração da coquilha, apenas as variantes de fecho vertical do *Squeeze Casting* podem ser consideradas, uma vez que nestas é possível um melhor controlo da condução da energia acústica, comparativamente às opções de fecho horizontal.

Tendo por base estas considerações, é possível estabelecer os requisitos gerais a cumprir pelo equipamento:

- Possibilidade de realização de *Squeeze Casting* direto/indireto;
- Possibilidade de aplicação de ultrassons à coquilha;
- Possibilidade de tratamento acústico direto pré-vazamento.

Com base nestes requisitos, é possível compilar uma lista de funções que o equipamento deverá contemplar:

- Função 1 – Movimento vertical – Fecho da coquilha / Aplicação da pressão;
- Função 2 – Movimento vertical – Extrator / Aplicação da pressão;
- Função 3 – Vigas capazes de suportar os esforços;
- Função 4 – Métodos de otimização da transferência da energia acústica;
- Função 5 – Sistema de proteção contra temperaturas extremas e aprisionamento;
- Função 6 – Sistema de regulação das distâncias entre a placa de trabalho e os apoios dos cilindros hidráulicos, para possibilidade de utilização de coquilhas com alturas diferentes.

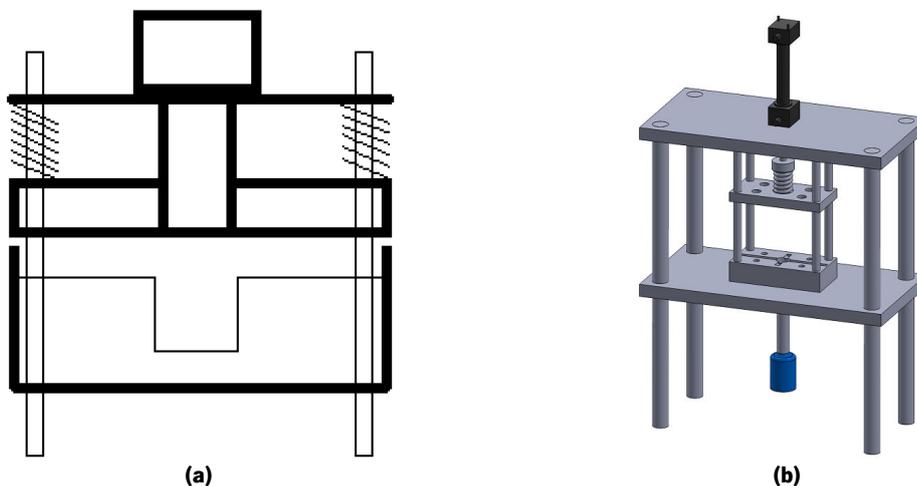
### 3.1.3. Geração de conceitos

De entre os métodos criativos explicados anteriormente, o *brainstorming* foi o mais utilizado na fase de projeto concetual. Esta fase iniciou-se depois da apresentação e definição do problema e de

alguma pesquisa bibliográfica. Durante a geração de conceitos, foi considerado que o equipamento tem que ter a flexibilidade de realizar operações de tecnologias ligeiramente diferentes – *Squeeze Casting* direto e indireto e tratamento acústico do metal líquido com excitação direta antes do vazamento e excitação da coquilha, para além de permitir a produção de componentes nos quais é necessário movimento de metal. Abaixo são apresentados os conceitos que solucionam os problemas intrínsecos às várias funções.

### **Funções 1 e 2 – Movimentos verticais (fecho da coquilha, aplicação de pressão e extrator)**

Solução 1 – Inicialmente, e por razões orçamentais, foi sugerida a utilização de apenas um cilindro hidráulico para as funções de fecho da coquilha e injeção do metal líquido. Este *design* cumpria as especificações, mas apresentava vários inconvenientes. Para *Squeeze Casting* direto, este conceito cumpria os requisitos de uma forma simples e eficaz. Contudo, para o *Squeeze Casting* indireto, no qual normalmente é necessário movimento do metal, esta opção implicava um sistema mecânico suplementar ao avanço e recuo do veio do cilindro hidráulico, de modo a manter a pressão no fecho da coquilha. Esse sistema à base de molas incrementava a complexidade e custo do equipamento, uma vez que as molas necessárias para o efeito eram inexistentes no mercado.



**Figura 3.1 - Desenho da primeira solução para as funções 1 e 2: a – Sketch; b – Desenho CAD.**

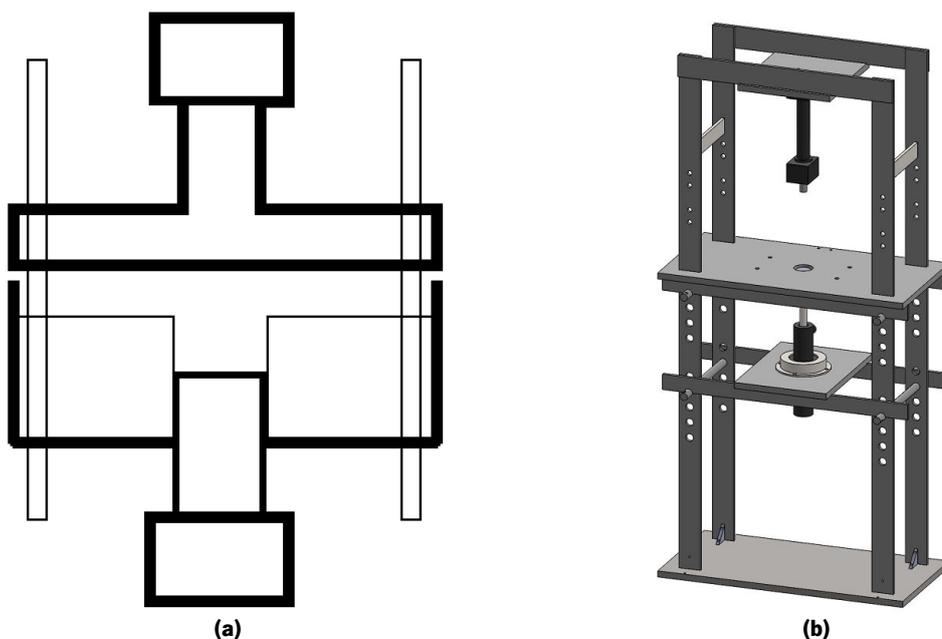
Prós

- Uso de apenas um cilindro hidráulico.

Contras

- É necessário um conjunto de molas para cada nível de pressão aplicada e altura de coquilha;
- Este modelo não dispõe de possibilidade de colocação de extrator.

Solução 2 – considerando o uso de dois cilindros, surge o conceito da Figura 3.2. O cilindro superior é responsável pelo fecho da coquilha e pressão do metal líquido (no caso do *Squeeze Casting* direto), enquanto o cilindro inferior é responsável pela injeção do metal líquido e consequente aplicação da pressão (no caso do *Squeeze Casting* indireto) e possibilita a utilização de extrator.



**Figura 3.2 – Desenho da segunda solução para as funções 1 e 2: a – Sketch; b – Desenho CAD.**

Prós

- Sistemas independentes de pressão e fecho da coquilha;
- *Design* simples;
- Permite testes em coquilhas diversas e com níveis de pressão variáveis, sem custos adicionais.

Contras

- Custo adicional de mais um cilindro hidráulico e respetivo controlo.

### **Função 3 – Vigas capazes de suportar os esforços**

Solução 1 – Vigas em I (Figura 3.3a)

As vigas em I são desenhadas para suportar momentos fletores elevados, o que as torna interessantes para a estrutura do projeto. Apresentam, no entanto, complicações com a maquinagem do seu perfil nas bases de apoio da coquilha, para além de serem a opção mais dispendiosa.

Solução 2 – Tubos quadrados (Figura 3.3b)

São resistentes a momentos fletores, mas menos comuns para a função desejada.

### Solução 3 – Viga retangular (Figura 3.3c)

São as vigas mais comuns, utilizadas normalmente em prensas manuais. Garantem facilidade na etapa de maquinagem e são a opção mais barata.

### Solução 4 – Veio roscado (Figura 3.3d)

É um elemento simétrico, logo oferece boa resistência aos momentos fletores. A possibilidade de roscar permite um número ilimitado de alturas de fixação das coquilhas (função 6), embora seja mais dispendioso do que as opções 3 e 4.

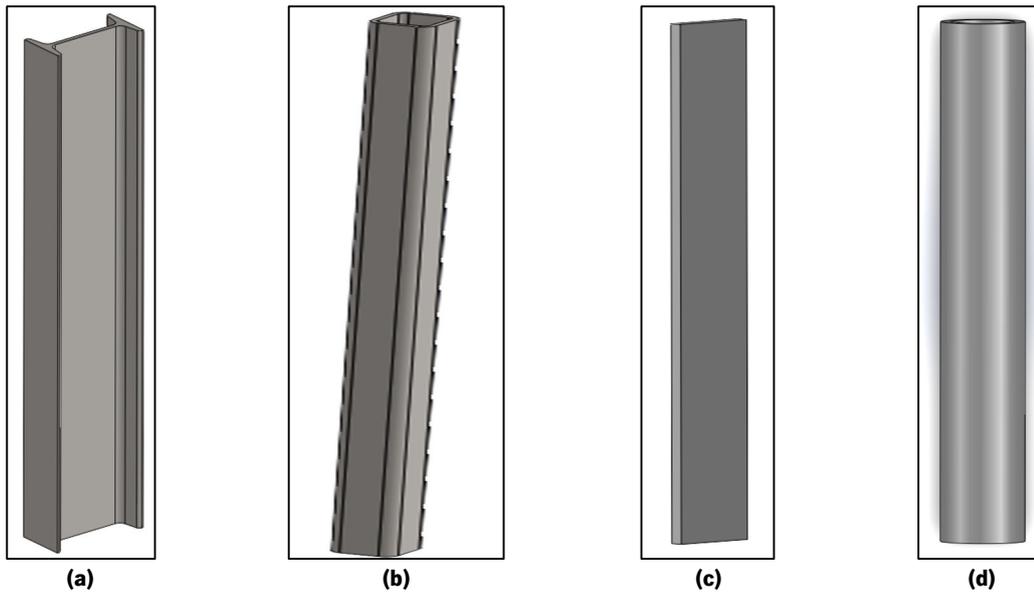


Figura 3.3 – Opções para as vigas estruturais.

## **Função 4 – Métodos de otimização da transferência da energia acústica**

### Conceito 1 – Anilhas cónicas

Limitadores da dissipação da energia acústica pela redução da área de secção.

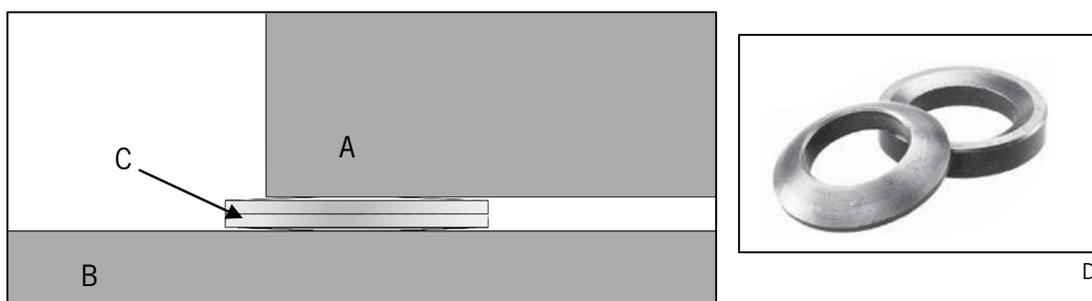


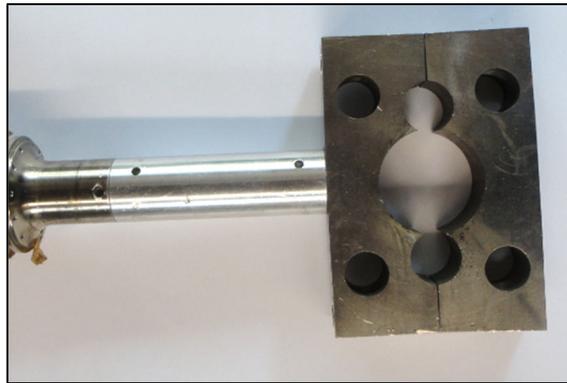
Figura 3.4 – Sistema de anilhas cónicas para limitar a dissipação de energia acústica: A – coquilha, B – Base de apoio, C – Anilhas cónicas. D – imagem real. (Retirado de [www.sumanenterprises.net](http://www.sumanenterprises.net) em 14/01/2013)

### Conceito 2 – Vibração antes do vazamento

Excitação com recurso a um radiador acústico antes do vazamento. Esta opção apenas impossibilita a excitação durante a aplicação da pressão.

### Conceito 3 – Utilização de grampos para coquilhas circulares.

Placa desenhada para a excitação de coquilhas circulares, com propriedades que ajudam à excitação acústica, conforme representado na Figura 3.5.

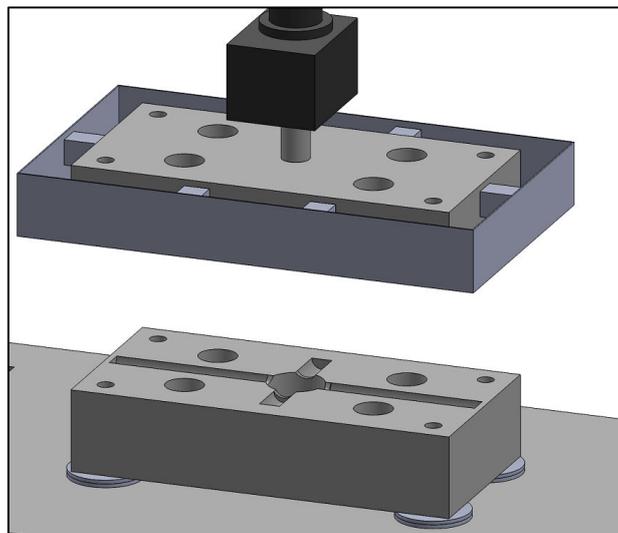


**Figura 3.5 – Grampos para coquilhas circulares.**

## **Função 5 – Sistema de proteção contra temperaturas extremas e aprisionamento**

As soluções apresentadas neste ponto são complementares entre si.

Solução 1 – Placa de proteção física em torno da coquilha que desce com o cilindro superior (Figura 3.6).



**Figura 3.6 – Chapa de proteção anti-salpicos.**

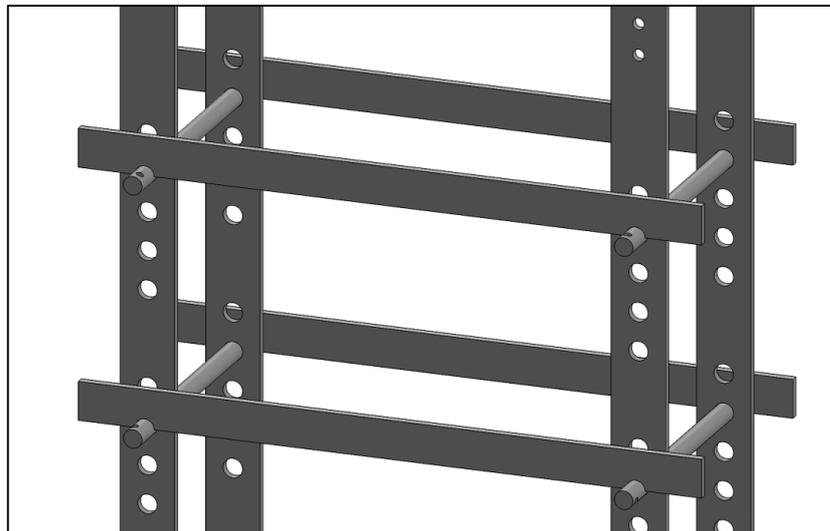
Solução 2 – Uso de luvas e equipamento de proteção contra as temperaturas elevadas.

Solução 3 – Criação da necessidade do uso das duas mãos para o manuseamento do equipamento. Nesse sentido, torna-se necessário o acionamento de duas alavancas para o funcionamento do equipamento.

**Função 6 – Sistema de regulação das distâncias entre a placa de trabalho e os apoios dos cilindros hidráulicos, para possibilidade de utilização de coquilhas com alturas diferentes**

Solução 1 – Sistema de cavilhas e furos para posicionamentos predefinidos

Nas opções de vigas A, B e C da Figura 3.3, é possível a furação desses elementos em pontos definidos para a colocação de cavilhas e barras que suportam os apoios dos cilindros hidráulicos e a base da coquilha, conforme ilustrado na Figura 3.7.



**Figura 3.7 – Sistema de cavilhas e barras para suporte da zona de vazamento e apoio dos hidráulicos.**

Prós

- Custo;
- Posicionamento exato;
- Simplicidade de construção.

Contras

- Posicionamento apenas nas zonas pré-definidas, o que limita a altura das coquilhas a utilizar.

Solução 2 – Veio roscado – posicionamento contínuo na zona roscada

Na opção de viga D da Figura 3.3, é possível fixar os elementos de suporte (placa de trabalho e placa suporte do cilindro inferior) com recurso a elementos roscados (conjunto de rosca, contra-rosca), permitindo posicionamento contínuo.



**Figura 3.8 – Desenho da segunda solução para a fixação das placas de trabalho.**

Prós

- Sistema de posicionamento exato e versátil.

Contras

- Custo;
- Resistência mecânica da zona roscada.

### **3.1.4. Avaliação, escolha e descrição das propostas para a solução final**

**Funções 1 e 2 – Movimentos verticais (fecho da coquilha, aplicação de pressão e extrator)**

Opção	Custo	Simplicidade	Controlo	Segurança
Cilindro e mola	+	-	-	-
Dois cilindros	-	+	+	+

O número de cilindros hidráulicos utilizado é a principal diferença entre as duas opções. A necessidade de um sistema auxiliar no caso da opção 1 torna-a menos viável do que a opção 2, que prima pela simplicidade. Esta última foi a escolhida para a solução final, embora seja mais dispendiosa caso fosse necessário adquirir o sistema hidráulico. Contudo, como se pretendia reaproveitar um sistema hidráulico já existente no laboratório, a escolha tornou-se mais simples.

### **Função 3 – Vigas capazes de suportar os esforços**

Opção	Custo	Resistência	Facilidade de maquinagem	Alturas de fixação da coquilha
Opção 1	---	+	---	-
Opção 2	-	-	-	-
Opção 3	+	---	+	-
Opção 4	-	-	---	+

O custo e os problemas que a opção 1 colocava à maquinagem inviabilizaram essa alternativa. A opção 4 é interessante, mas obriga a uma solução de posicionamento por roscagem, o que para altas pressões não é ideal. As opções 2 e 3 são semelhantes nos benefícios que apresentam. Contudo, embora a opção 2 seja mais resistente, a opção 3 apresenta um custo menor e facilita as operações necessárias de maquinagem, tendo, por isso, sido escolhida como solução final.

### **Função 4 – Métodos de otimização da transferência da energia acústica**

Todas as opções são válidas e serão utilizadas dependendo da coquilha que for selecionada e do método de excitação acústica utilizado. A opção 1 – anilhas cónicas é mais apropriada para coquilhas grandes que necessitem de vários pontos de apoio e sistema de guiação. A opção 2 – vibração antes do vazamento é válida para todos os ensaios onde essa seja a forma desejada de aplicação dos ultrassons, não sendo apropriada nos casos onde se deseja vibração durante a aplicação de pressão. A opção 3 – uso de grampos já existentes, manufaturados para potenciar a vibração acústica, é viável.

### **Função 5 – Sistema de proteção contra temperaturas extremas e aprisionamento**

Todas as soluções apresentadas são viáveis, aplicáveis e não mutuamente exclusivas, pelo que serão simultaneamente utilizadas.

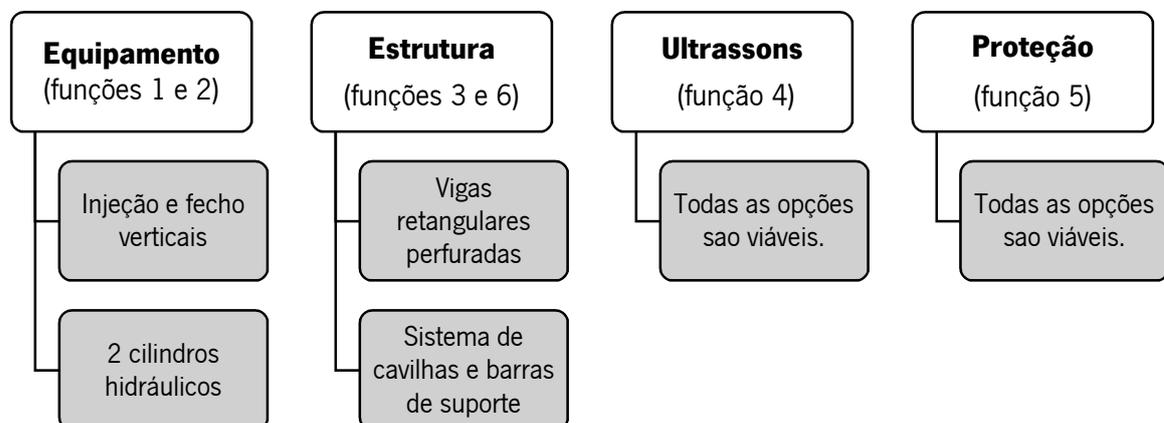
### **Função 6 – Sistema de regulação das distâncias entre a placa de trabalho e os apoios dos cilindros hidráulicos, para possibilidade de utilização de coquilhas com alturas diferentes**

A solução escolhida para esta função depende diretamente da escolha realizada para a função 3. Assim, a opção 2 da função 6 está obrigatoriamente associada à opção 4 da função 3, enquanto as restantes opções da função 3 implicam a opção 1 da função 6. A utilização do sistema de cavilhas e barras apresenta vantagens em termos de custo e resistência mecânica, comparativamente ao veio roscado, embora apresente desvantagens ao nível do posicionamento, as quais podem, contudo, ser colmatadas com o aumento do número de furos. Assim, foi escolhida a opção 1, em linha com a escolha definida para a função 3.

Opção	Custo	Resistência	Posicionamento
Opção 1	+	+	-
Opção 2	-	-	+

### Conjunto das soluções finais

Como definido no ponto anterior, as soluções escolhidas são as seguintes:



Na Figura 3.9 está representada a solução final e na Tabela 3.1 a lista de peças.

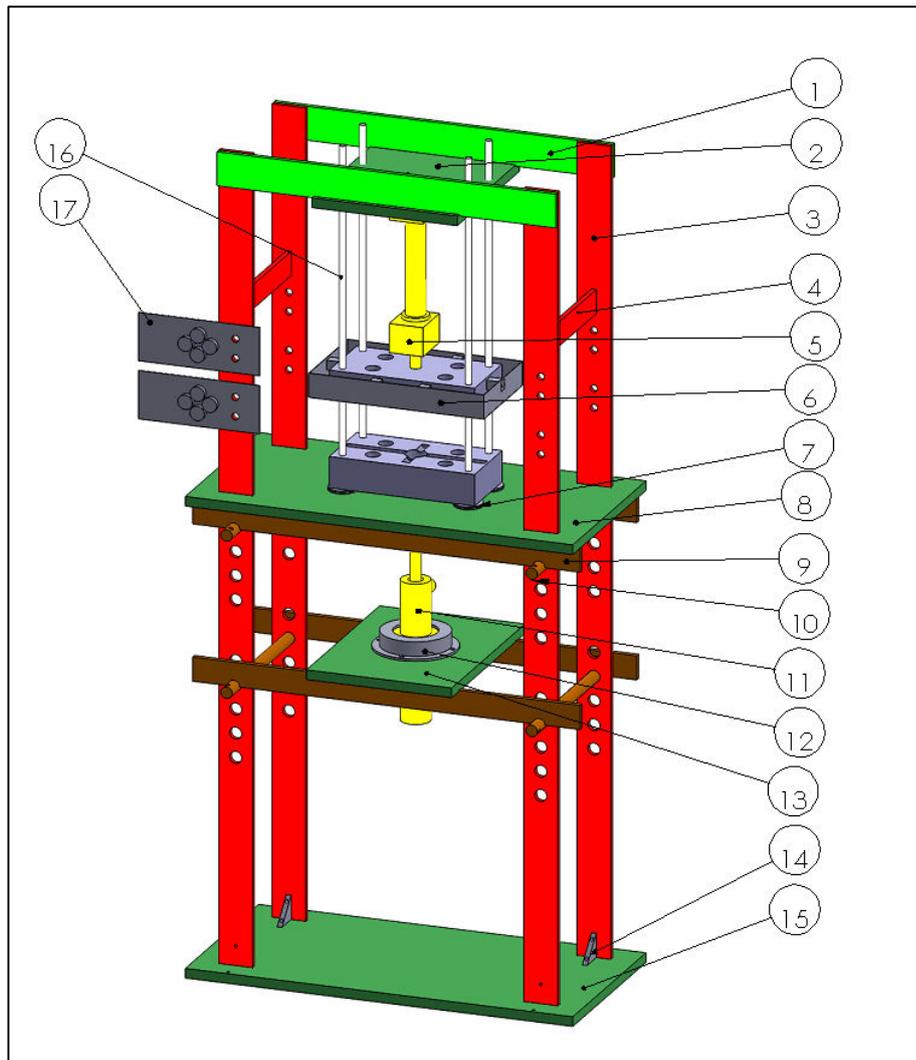


Figura 3.9 – Sistema de *Squeeze Casting* com fecho vertical e aplicação de pressão vertical.

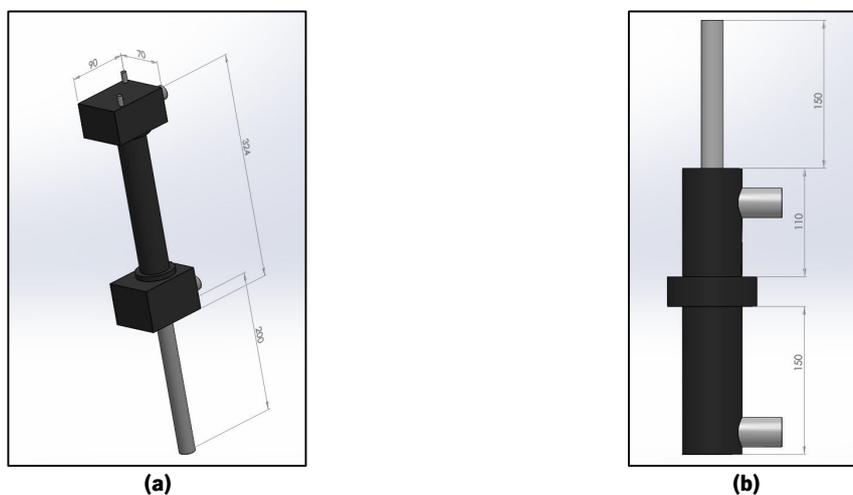
Tabela 3.1 – Lista de Peças

Nº	Designação	Material
1	Barra de suporte superior	Aço de construção ck 45
2	Placa suporte do cilindro superior	Aço de construção ck 45
3	Viga	Aço de construção ck 45
4	Barra auxiliar de suporte	Aço de construção ck 45
5	Cilindro hidráulico superior	
6	Placa anti-salpicos	Aço de construção ck 45
7	Anilha cônica	
8	Placa de trabalho	Aço de construção ck 45
9	Barra de suporte	Aço de construção ck 45
10	Cavilha	Aço de construção ck 45
11	Cilindro hidráulico inferior	
12	Camisa de aperto do cilindro inferior	Aço de construção ck 45
13	Placa suporte do cilindro inferior	Aço de construção ck 45
14	Nervuras	Aço de construção ck 45
15	Placa chão	Aço de construção ck 45
16	Guias para moldações retangulares	Aço de construção ck 45
17	Zona de aperto das válvulas direcionais	

## 3.2. Projeto Estrutural

### 3.2.1. Definição posicional

Um dos catalisadores deste projeto foi a possibilidade de reutilização de um sistema hidráulico existente nas oficinas de fundição do DEM, cujos cilindros estão representados na Figura 3.10. Todavia, isso provou ser uma limitação, pois o conjunto hidráulico disponível tem uma pressão máxima aplicável na ordem dos 160 bar (16MPa), bastante abaixo dos valores indicativos encontrados na literatura – 30 a 150 MPa. O cilindro superior tem um curso de 200mm e o inferior um curso de 150mm.



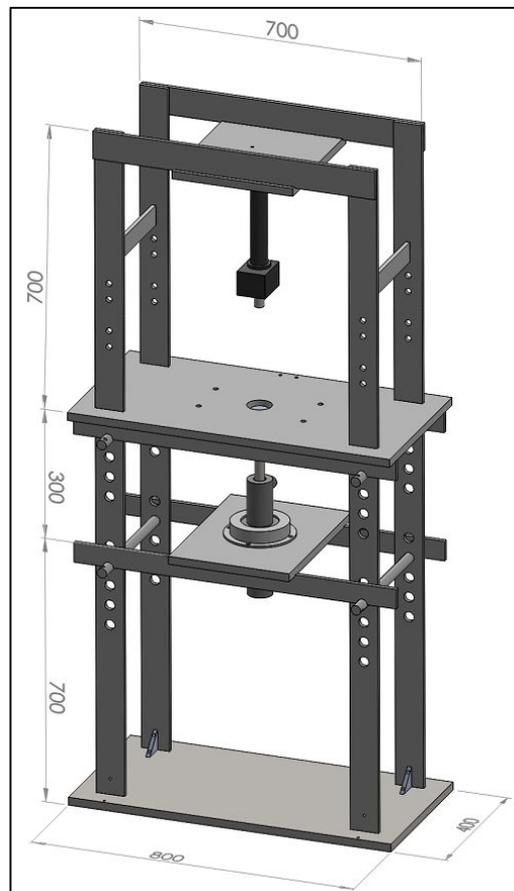
**Figura 3.10 – Cilindros hidráulicos a reutilizar: a – cilindro superior; b – cilindro inferior.**

A zona de trabalho, representada pela placa que suporta a coquilha, deve estar a uma altura aproximada de 1250mm. Esta altura é definida considerando as recomendações ergonômicas para trabalho em pé e verificando, para o *staff* atual do laboratório, a altura mais prática para efetuar os vazamentos.

A partir dos dados da Figura 3.10 é possível definir as localizações dos furos para fixação das placas de suporte. Como mencionado anteriormente, a zona de trabalho deve estar a 1250mm de altura e, tendo em conta que são necessários cerca de 80mm para os suportes das placas, o primeiro furo de posicionamento deverá ser realizado a 1170mm, sendo os restantes (5 furos) espaçados com intervalos de 50mm. Esse intervalo permite a utilização de uma grande variedade de tamanhos de coquilha. Na Figura 3.11 estão representadas as dimensões gerais da estrutura de suporte com as distâncias entre as diferentes zonas.

A zona de fixação do cilindro inferior situa-se a meio do corpo do cilindro. Assim, a sua zona de fixação deve ficar a aproximadamente 300mm (cerca de 150mm de curso da haste e 110mm de corpo do cilindro). O restante espaço destina-se à colocação de um pistão e respetivos mecanismos de fixação.

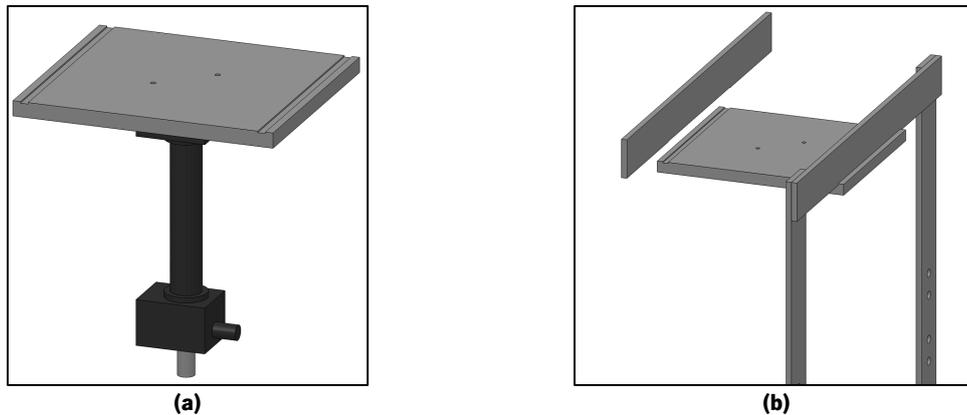
Pelo facto de a fixação do cilindro superior ser efetuada no topo do mesmo, a distância da zona de fixação à zona de trabalho é superior à anterior. A distância é aproximadamente 700mm, dos quais 324mm resultam do tamanho do corpo do cilindro e 200mm de curso da haste. O restante espaço destina-se à colocação de um pistão (para o caso do *Squeeze Casting* direto) e para acomodar a coquilha.



**Figura 3.11 – Dimensões gerais da estrutura.**

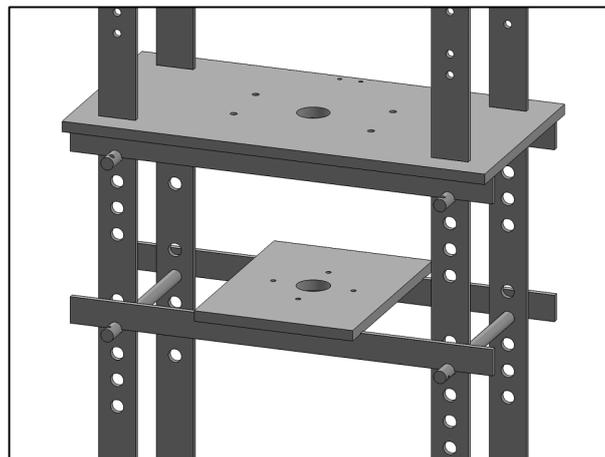
O cilindro superior, responsável pela aplicação da pressão no *Squeeze Casting* direto e pelo fecho da coquilha no *Squeeze Casting* indireto, é da *Festo Didatic®*. Este tipo de cilindro possui duas zonas distintas de fixação, a primeira para casos nos quais é necessária a colocação do cilindro sobre uma corredeira, a segunda, com dois parafusos m6 na zona oposta à saída da haste. Assim, a fixação do primeiro cilindro é feita com uma placa de aço de construção de dois centímetros de espessura, perfurada na zona central para fixação do cilindro. Na Figura 3.12 está representada a solução da

fixação do cilindro superior à respetiva placa que o suporta. Os rasgos na placa de suporte destinam-se à garantia do correto posicionamento relativo deste conjunto durante o processo de soldadura.



**Figura 3.12 – Solução de fixação do cilindro superior: a – Fixação do cilindro hidráulico superior à placa de suporte; b – Fixação da placa de suporte do cilindro superior ao resto da estrutura.**

A fixação da placa de suporte ao resto da estrutura é feita em dois momentos, primeiro às duas barras horizontais, na zona do rasgo por soldadura, posteriormente estas são soldadas nas pontas às vigas verticais retangulares, fabricadas de chapa de 10mm, com as dimensões 1700mm x 70mm. A fixação da placa suporte do cilindro inferior e da placa de trabalho é efetuada conforme especificado no ponto 3.1.4 – com um conjunto de cavilhas e barras de suporte que aloca as ditas placas em locais predefinidos (Figura 3.13). A localização desses foi definida com base no curso das hastes dos cilindros e no tamanho dos mesmos.



**Figura 3.13 – Fixação das placas de trabalho e de suporte do cilindro inferior.**

A zona de fixação de toda a estrutura ao chão está representada na Figura 3.14. É efetuada com recurso a uma placa de espessura 20mm e nervuras aparafusadas aos elementos a ligar (vigas verticais e placa chão).

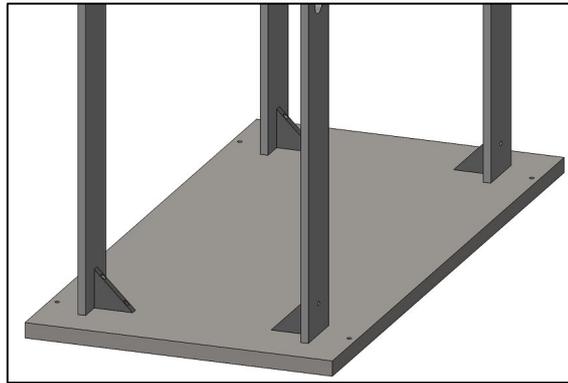


Figura 3.14 – Fixação da estrutura ao solo.

### 3.2.2. Estudo de resistência mecânica

Estando definidas as posições relativas dos principais componentes, o passo que se segue é verificar se as várias partes da estrutura de suporte resistem à carga que os cilindros hidráulicos dispõem. É importante referir que todos os componentes foram projetados para serem construídos em aço de construção comum – CK45 / AISI 1045. Na Tabela 3.2 estão descritas as características mecânicas do material proposto.

**Tabela 3.2 – Características mecânicas do material para a estrutura do equipamento de acordo com o catálogo da empresa FRAMADA [39]**

Rp 0,2% Kg/mm <sup>2</sup>	Rm Kg/mm <sup>2</sup>	A%
33	59	4

Rp – Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%.  
Rm – Tensão de rutura.  
A% – Extensão após rutura.

O componente que mais esforço suporta é a base de apoio do cilindro superior, representada na Figura 3.12, pelo que será o utilizado para demonstrar o processo de dimensionamento. Este foi configurado de modo a ser uma placa quadrada (300x300mm), com 20mm de espessura, com dois furos para fixação do cilindro hidráulico e com dois rasgos para o correto posicionamento relativo às outras placas. A carga aplicada é função da pressão e da área do pistão, cujo diâmetro é 32mm. A área do pistão é:

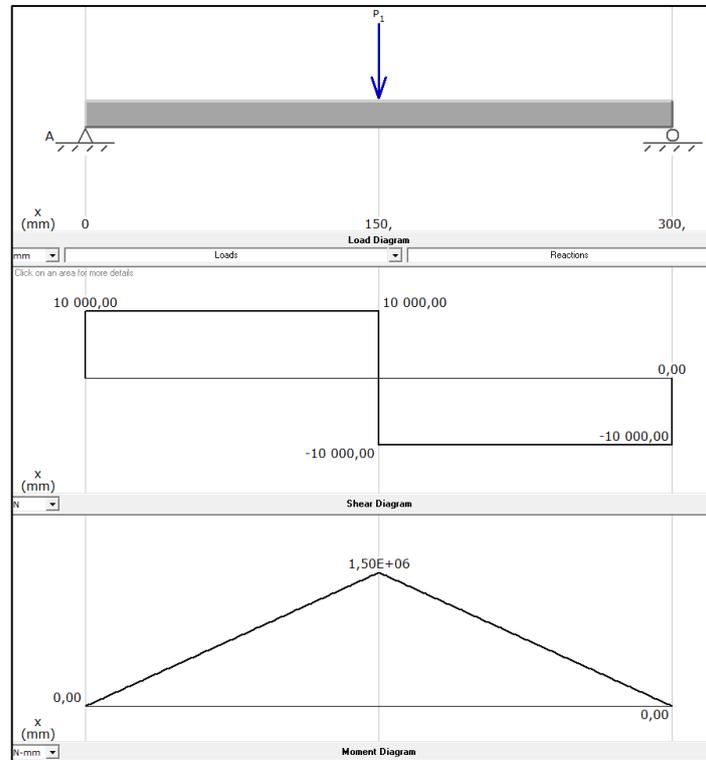
$$A_p = \pi 16^2 = 803.84 \text{cm}^2 \quad (3.1)$$

Considerando a aplicação da pressão limite do cilindro de fecho da coquilha – 160 bar ou 163,1 kg/cm<sup>2</sup>, a carga a suportar pelo apoio do cilindro hidráulico é:

$$F_1 = A_p \times 163,1 \text{kg/cm}^2 = 2057 \text{kg} = 20180 \text{N} \quad (3.2)$$

O dimensionamento mecânico de todos os elementos da estrutura foi efetuado com recurso aos programas informáticos *Solidworks* e *MD Solids 3.5*. Seguidamente, serão apresentadas simulações

do comportamento dos vários elementos estruturais à carga máxima aplicável pelo conjunto hidráulico existente. Na Figura 3.15 estão representados os esforços suportados pela placa de suporte do cilindro superior.



**Figura 3.15 – Esforços suportados pela placa suporte do cilindro superior.**

A situação representada na Figura 3.15 é uma simplificação agravante da situação real. No caso simulado foi considerada uma carga pontual, que na realidade é distribuída numa extensão de 40mm. O valor do momento fletor máximo é importante para calcular a tensão máxima[40], segundo a equação (3.3, onde M representa o momento fletor máximo, W o módulo de resistência à flexão.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} \quad (3.3)$$

Para secções retangulares, o módulo de resistência à flexão é definido pela equação (3.4, onde b é o comprimento da secção e h a altura da secção.

$$W = \frac{1}{6}bh^2 \quad (3.4)$$

De acordo com a Figura 3.15, o momento fletor máximo é igual a  $1,50 \times 10^6$ . Assim, para uma placa de espessura de 20mm, a tensão máxima é:

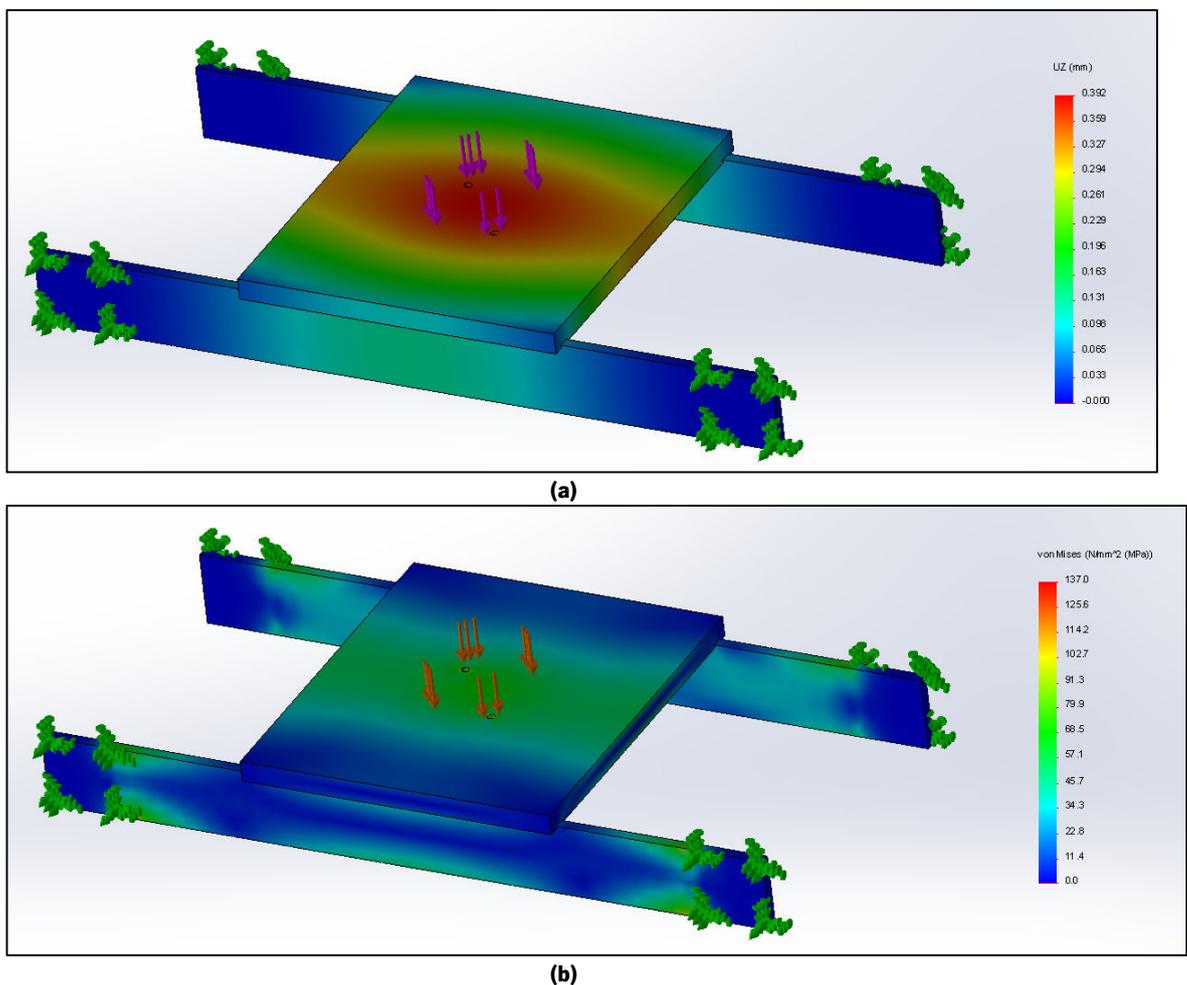
$$\sigma_{max} = \frac{1500000}{20000} = 75MPa$$

A alternativa ao uso de uma placa de 20mm de espessura é o uso de uma placa mais fina, por exemplo, de 10mm de espessura; nesse caso a tensão máxima seria:

$$\sigma_{max} = \frac{1500000}{5000} = 300MPa$$

Deste modo, e tendo em conta que a tensão de limite proporcional do material escolhido é 330 MPa, a escolha incide na primeira opção, dado que a segunda opção não permite a aplicação de um coeficiente mínimo de segurança.

Na Figura 3.16a e b está representado em detalhe o comportamento da placa de suporte do cilindro hidráulico superior, quando sujeita à carga máxima do conjunto hidráulico.



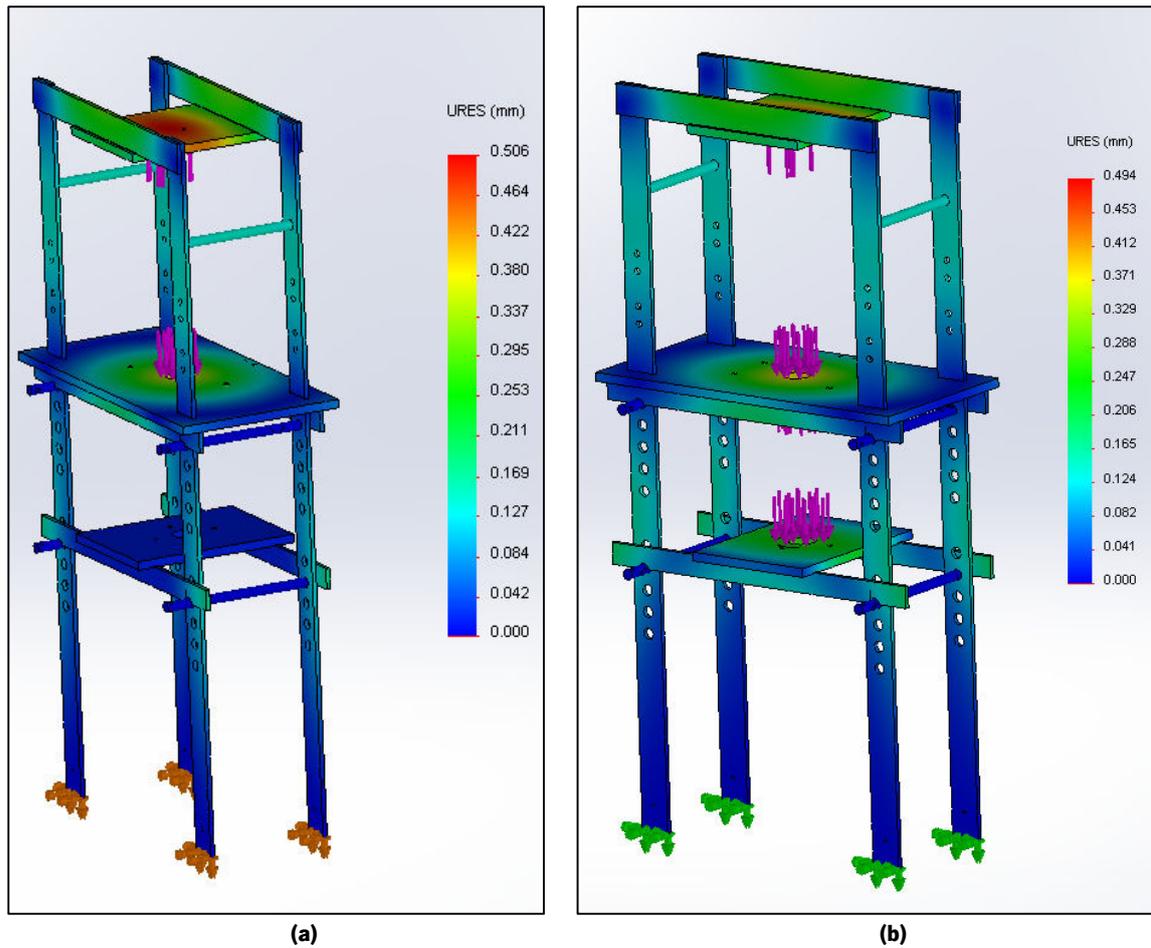
**Figura 3.16 - Simulação do comportamento da placa suporte do cilindro superior quando sujeita à carga máxima do cilindro; a – Deslocações, b – Tensão – Critério Von Misses.**

A carga, de valor aproximado de 20000N, é aplicada numa superfície de dimensão igual à do cilindro superior, na zona designada para o apoio do cilindro. A fixação às vigas é simulada por uma fixação geométrica fixa, o que não representa a realidade. No entanto, este primeiro estudo apenas se dirige ao comportamento da placa superior, pelo que a aproximação efetuada é aceitável. Em

termos de deformação, este elemento sofrerá uma deformação aproximada de 0.4mm, quando sujeito à carga máxima (Figura 3.16a). Essa deformação será superior quando considerado o sistema completo devido à acumulação com as deformações dos outros componentes. Verifica-se que a tensão máxima atingida (aproximadamente 137MPa) é bastante inferior à tensão limite convencional de proporcionalidade, apresentada na Tabela 3.2, e não é perceptível nas imagens apresentadas pois encontra-se junto aos furos e ocorre devido à concentração de tensões provocada pelos mesmos.

Este valor pode indicar a possibilidade de reduzir a espessura da placa superior de suporte, mas, considerando um coeficiente de segurança de 1.2 ou 1.5, o valor aproxima-se do limite, pelo que se manteve a espessura de dois centímetros, já que a poupança económica com a redução da espessura das placas de suporte não era significativa.

O comportamento do conjunto completo, quando submetido à carga máxima, quer apenas do cilindro superior, quer de ambos os cilindros, foi simulado conforme a Figura 3.17. O primeiro simula o *Squeeze Casting* direto, no qual a aplicação de pressão e fecho da coquilha são efetuados no mesmo movimento pelo cilindro superior. Este caso está representado na Figura 3.17a. Tal como referido anteriormente, o componente mais solicitado é a placa de suporte do cilindro superior. Neste verifica-se uma deformação de 0,5mm, superior à obtida na simulação anterior, visível na Figura 3.16a, o que resulta da acumulação dos deslocamentos de todos os componentes do sistema estrutural. O sistema de cavilhas que suporta a placa de trabalho e a placa suporte do cilindro inferior é perfeitamente capaz de suportar os esforços que lhe foram aplicados, estando talvez ligeiramente sobredimensionado. No entanto, os benefícios económicos de reduzir a espessura da cavilha não justificam a realização dessa mudança. A simulação da Figura 3.17b foi efetuada com a aplicação da carga máxima pelos dois cilindros. Tal como no caso anterior, verifica-se que a estrutura é perfeitamente capaz de suportar os esforços a que será sujeita.

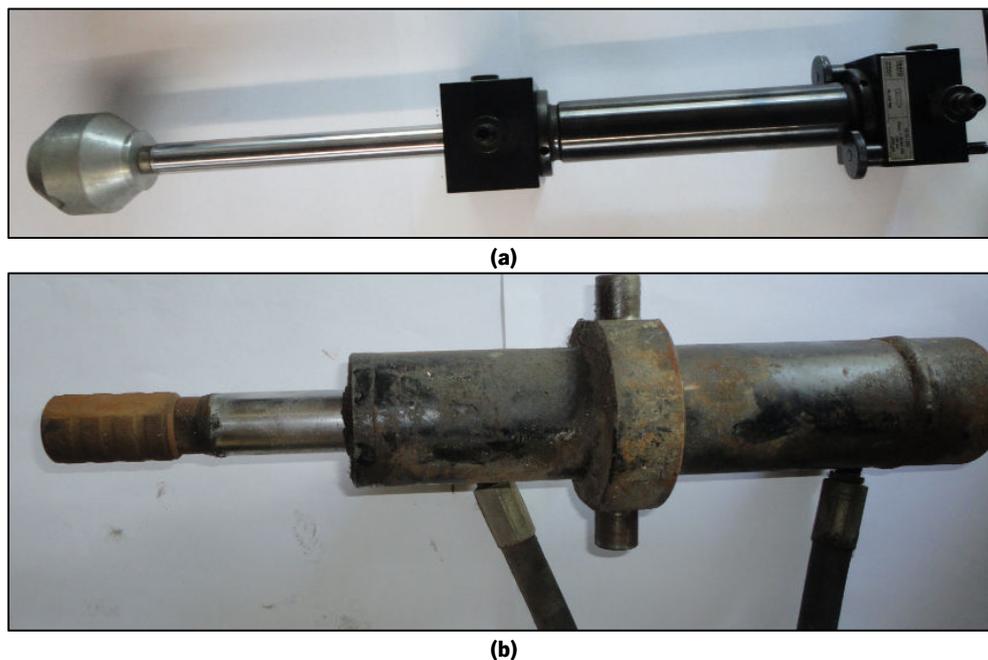


**Figura 3.17 - Simulação do comportamento da estrutura de suporte: a – quando submetida à carga máxima do cilindro superior; b – quando submetida à carga máxima de ambos os cilindros.**

No anexo I estão apresentados os desenhos técnicos dos componentes principais da estrutura do equipamento.

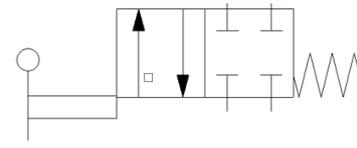
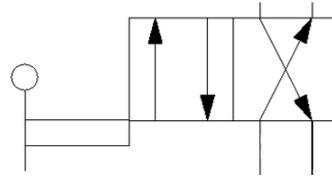
### 3.3. Projeto hidráulico

Tal como referido no início da secção 3.2, a reutilização de um conjunto hidráulico já existente é um dos pilares fundamentais do projeto, já que o custo da aquisição de um conjunto hidráulico novo é incomportável no contexto económico atual. Assim, esta secção destina-se à identificação e descrição dos vários componentes do conjunto hidráulico existente e, numa segunda fase, à descrição da solução hidráulica completa para o equipamento de *Squeeze Casting* assistido por ultrassons. Na Figura 3.18 estão representados os cilindros hidráulicos reutilizados no projeto do equipamento em estudo. O cilindro A é da marca *Festo Didactic®* e tem um curso de 200mm, uma haste de 22mm e um pistão com 32mm de diâmetro. O cilindro tem uma pressão limite de 160 bar, embora a sua pressão recomendada de trabalho seja de 80 bar. No cilindro B não foi possível identificar a marca nem o modelo; contudo, este apresenta um curso de 150mm e encontra-se a trabalhar a uma pressão de 60 bar.



**Figura 3.18 – Cilindros reutilizados no projeto do equipamento em estudo; a – 200mm de curso; b – 150mm de curso.**

Na Figura 3.19 está representada uma das válvulas 4/2 reaproveitadas. Estas válvulas são utilizadas para a manipulação dos cilindros hidráulicos, através do manuseamento da alavanca numa das direções possíveis.



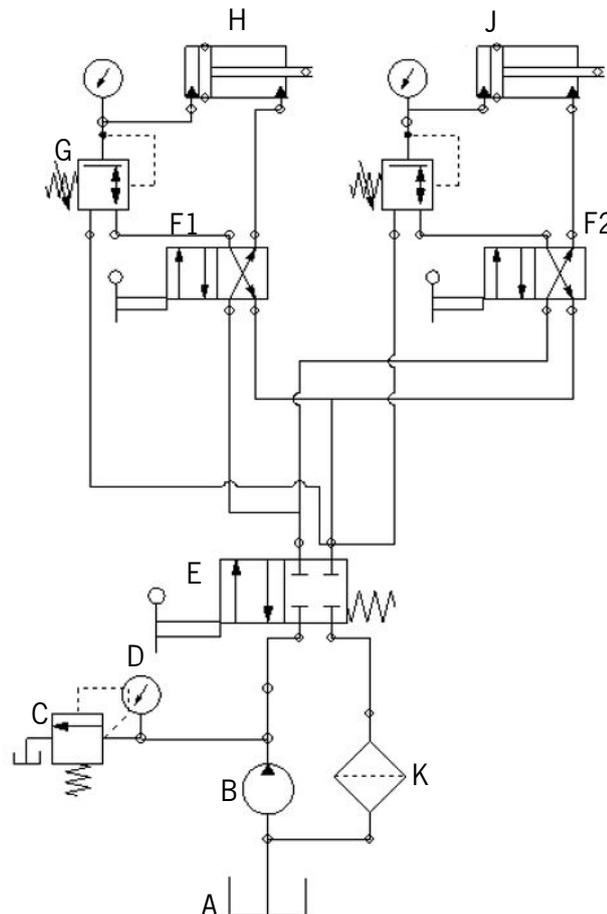
(a)

(b)

(c)

**Figura 3.19 – Válvulas 4/2: a – Fotografia de uma das válvulas reaproveitadas; b – Simbologia utilizada para as válvulas direcionais; c – Simbologia utilizada para a válvula de segurança.**

Às válvulas são acoplados reguladores de pressão e manómetros para monitorização da pressão efetiva nos cilindros. Por questões de segurança, é necessária uma terceira válvula que controle o fornecimento de pressão hidráulica às duas válvulas direcionais, de acordo com as especificações indicadas na secção 3.4. Esta terceira válvula (Figura 3.19c), por fechar automaticamente caso deixe de ser acionada, obriga o operador do equipamento a utilizar as duas mãos na sua manipulação, reduzindo assim o risco de aprisionamento. O esquema da Figura 3.20 representa o circuito hidráulico necessário para o correto funcionamento do equipamento em estudo.



**Figura 3.20 – Esquema do sistema hidráulico planeado. A) Depósito do fluido hidráulico; B) Bomba hidráulica; C) Válvula reguladora de pressão de segurança; D) Manómetro; E) Válvula de passagem de segurança; F) Válvula direcional; G) Regulador de pressão; H) Cilindro hidráulico superior; J) Cilindro hidráulico inferior; K) Filtro.**

O sistema é composto por um depósito de fluido, uma bomba hidráulica, válvulas de segurança, válvulas de regulação de pressão, válvulas direcionais 4/2, atuadores hidráulicos, manómetros e um filtro. O funcionamento do sistema prende-se com o acionamento das válvulas direcionais (F1 e F2) e da válvula de segurança (E) para o acionamento dos cilindros hidráulicos (H e J). O estudo do circuito foi efetuado com recurso ao programa informático *Automation Studio 5.0*, que permite a simulação do funcionamento de circuitos hidráulicos.

### **3.4.Segurança**

Alguns pressupostos foram tidos em consideração para garantir a segurança dos futuros utilizadores deste equipamento. Esses pressupostos derivam dos aspetos apresentados na secção 2.4.3 e têm como objetivo minimizar os riscos devido a temperaturas extremas e os riscos de aprisionamento e esmagamento.

Assim sendo, no desenvolvimento do projeto foram estabelecidos dois objetivos quanto à segurança. Primeiramente, o acoplamento de uma estrutura protetora que minimizasse o risco de projeção de matérias quentes no momento da aplicação da pressão, estrutura esta ilustrada na Figura 3.9. O segundo objetivo prende-se com a estrutura do sistema hidráulico, o qual foi desenhado de modo a que seja necessária a utilização das duas mãos para o acionamento do sistema, tal como descrito na secção 3.3. Também é aconselhável o uso de luvas, roupa e óculos protetores durante as operações de vazamento – recomendações gerais de todas as tecnologias de fundição.

## CAPÍTULO 4. PROCEDIMENTO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Devido a limitações orçamentais decorrentes da conjuntura nacional, não foi possível a construção do equipamento. No entanto, graças à colaboração de uma empresa local – Grupo SOLART, foi possível a validação do conceito base do equipamento, a solidificação de ligas de alumínio sob pressão, assistida por excitação acústica. A liga Al-Si escolhida para a validação experimental deste projeto foi a liga AlSi9Cu3Fe. Este tipo de liga é usada em aplicações onde a ductilidade não é imprescindível, sendo especialmente utilizada em aplicações automóveis e aeronáuticas devido às suas excelentes propriedades mecânicas. Na Tabela 4.1 é apresentada a composição química teórica e real da liga utilizada.

**Tabela 4.1 – Composição da liga utilizada.**

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Fonte</i>
<b>AlSi9Cu3Fe</b>	7,5-9,5	1,30	0,10	3,0-4,0	0.5	3,0	0,35	(1)
<b>Utilizada</b>	9,15	0,66	0,18	2,25	0,26	0,47	0,10	(2)

(1) Conforme especificado pela *Aluminium Association, Inc.*, em [12]

(2) Composição medida por espectrometria de emissão ótica na Empresa *Firmago* – Fundação de Alumínio, Lda, Braga

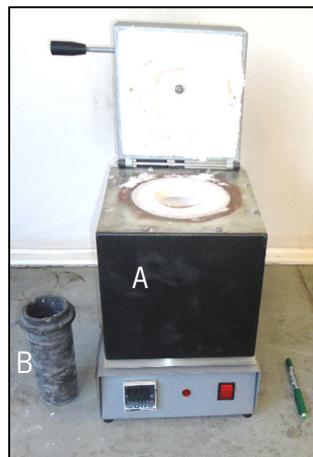
Durante a solidificação ocorre uma série de reações químicas, que variam em função da liga utilizada. Estas reações são apresentadas na *Tabela 4.2*. A forma das diferentes fases é, em parte, identificável através da análise microscópica.

**Tabela 4.2 – Reações químicas durante a solidificação da liga AlSi9Cu3Fe. (Adaptado de [41])**

	<b>Reações</b>	<b>Temperaturas (°C)</b>
<b>1</b>	$L \rightarrow (Al)$	609
<b>2</b>	$L \rightarrow (Al) + Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2 + (Al_5FeSi)$	590
<b>3</b>	$L \rightarrow (Al) + Si + Al_5FeSi$	575
<b>4</b>	$L \rightarrow (Al) + Al_2Cu + Al_5FeSi$	525
<b>5</b>	$L \rightarrow (Al) + Al_2Cu + Si + Al_5Mg_8Cu_2Si_6$	507

#### 4.1. Equipamentos

A fusão da liga utilizada foi efetuada num forno de resistências elétricas e cadinho móvel de carboneto de silício, SiC, com capacidade para meio litro, existente no laboratório de fundição do DEM, conforme apresentado na Figura 4.1. As operações de tratamento por ultrassons do banho metálico, nomeadamente a desgaseificação, foram efetuadas com o cadinho dentro do forno para melhor controlo e homogeneidade da temperatura no banho.



**Figura 4.1 – A – Forno e B – Cadinho utilizados nos ensaios.**

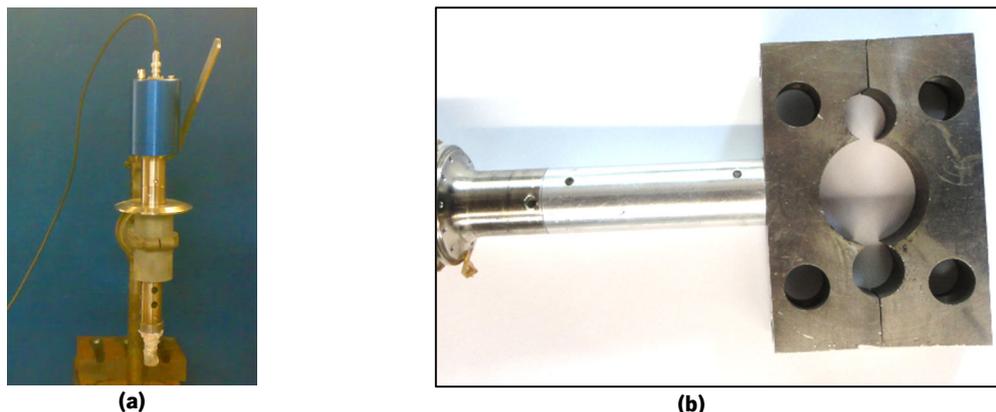
Foi utilizada uma moldação permanente já existente no laboratório de fundição do DEM, a qual foi previamente limpa e pintada com uma tinta refratária – *Placote 2000*, conforme representado na Figura 4.2.



**Figura 4.2 – Moldação permanente utilizada nos ensaios.**

Para a transmissão de energia acústica aos banhos foram utilizados dois equipamentos de ultrassons baseados na tecnologia MMM, conforme descrito na secção 2.3.1. O primeiro equipamento foi adaptado com um radiador acústico para excitação direta do banho, doravante chamada de tratamento isotérmico, enquanto o segundo foi acoplado a um conjunto de grampos especialmente projetados para potenciar a eficiência do tratamento acústico de forma indireta e ao longo de todo o tempo de arrefecimento (Figura 4.3), doravante chamado de tratamento contínuo. Em ambas as configurações foram controladas a potência elétrica e a frequência de vibração.

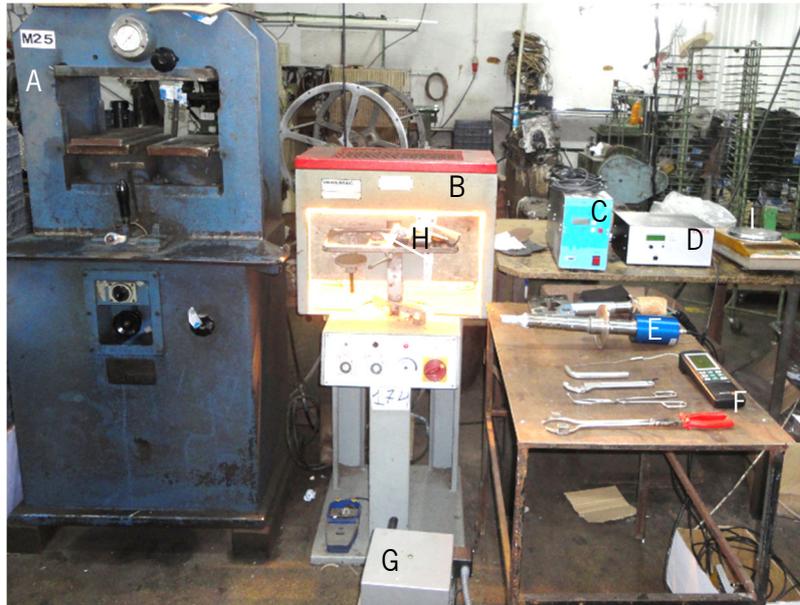
A aplicação da pressão durante o arrefecimento foi realizada através de uma prensa hidráulica invertida, cuja carga máxima é de 120kg/cm<sup>2</sup> e o curso é de 200mm. O controlo da pressão é realizado por um manómetro, sendo a sua regulação manual. O equipamento utilizado está representado pela letra A da Figura 4.4.



**Figura 4.3 – Equipamentos de ultrassons baseados na tecnologia MMM utilizados para: a – tratamento isotérmico do banho metálico; b – tratamento contínuo do banho metálico.**

## **4.2.Descrição do ambiente experimental**

Os ensaios foram efetuados em ambiente industrial com recurso aos equipamentos do laboratório de fundição do DEM e à prensa cedida pela empresa, nas suas instalações, conforme o aparato experimental apresentado na Figura 4.4.



**Figura 4.4 – Aparato experimental. A – Prensa; B – Sistema para pré-aquecimento da coquilha; C – Fonte de alimentação do ultrassons para tratamento contínuo; D – Fonte de alimentação do ultrassons para tratamento isotérmico; E – Equipamento ultrassônico para tratamento isotérmico; F – Sistema de medição de temperatura; G – Forno; H – Coquilha e punção; I – Balança.**

### **4.3.Procedimento Experimental**

O objetivo deste trabalho é estudar a influência conjunta do tratamento acústico do banho metálico e da aplicação de pressão durante a fase de solidificação, procurando verificar o efeito destas duas técnicas na prevenção de estruturas dendríticas, na afinação de grão e na modificação do silício eutético e dos elementos intermetálicos na liga AlSi9Cu3Fe. Este estudo inclui duas técnicas distintas de aplicação do tratamento acústico – **diretamente ao banho metálico isotermicamente antes da aplicação da pressão e excitação indireta através da coquilha durante a aplicação de pressão.**

#### **4.3.1.Parâmetros do material**

As cargas de fusão utilizadas foram preparadas a partir de lingote comercial da liga AlSi9Cu3Fe, descrita na secção 4.1. O lingote foi cortado em cargas com dimensões compatíveis com o cadinho da Figura 4.1, sendo posteriormente secas para eliminação do lubrificante de corte.

#### **4.3.2.Parâmetros de processamento**

Nesta secção estão resumidos os parâmetros utilizados em todos os ensaios. O primeiro passo do processamento do metal líquido em todos os ensaios foi a degaseificação do banho metálico.

Este procedimento foi efetuado de um modo invariável, conforme os parâmetros indicados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Parâmetros do processo de desgaseificação.**

Liga	Parâmetros da Desgaseificação acústica			
	Aplicação direta (Tratamento isotérmico)		Aplicação indireta (Tratamento contínuo)	
	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)
AlSi9Cu3Fe	680	60	680	60

A fonte de energia acústica usada permite a excitação do banho num largo espectro de frequências e múltiplas potências elétricas, sendo que os valores utilizados estão indicados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Parâmetros de processamento do tratamento ultrassônico.**

Liga	Parâmetros de ultrassons			
	Aplicação direta (Tratamento isotérmico)		Aplicação indireta (Tratamento contínuo)	
	Frequência (± 0.25kHz)	Potência (W)	Frequência (± 0.25kHz)	Potência (W)
AlSi9Cu3Fe	20	300	20	300

A conjugação dos parâmetros das duas tecnologias centrais deste estudo está representada na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6. Conforme referido na secção 2.2.4, a aplicação de pressão após a solidificação em nada beneficia as propriedades do fundido. No entanto, a configuração experimental impossibilitou a medição da temperatura durante a aplicação de pressão, pelo que foi necessário estabelecer um tempo mínimo de 30s após o vazamento como duração da aplicação de pressão. Os ensaios 1 e 2 foram realizados para controlo das condições de solidificação sob o efeito de apenas uma das tecnologias.

**Tabela 4.5 – Parâmetros utilizados nos ensaios com aplicação direta dos ultrassons (isotérmica).**

Ensaio	Parâmetros dos ensaios com aplicação isotérmica de ultrassons			
	Pressão		Ultrassons	
	Pressão (MPa)	Tempo (s)	T (°C)	Tempo (s)
0	-	-	-	-
1	5	30	-	-
2	-	-	620-630	60
3	5	30	620-630	60
4	10	30	620-630	60
5	10	30	640	60

Os dados referentes ao ensaio efetuado com excitação indireta e contínua estão representados na Tabela 4.6. Contrariamente aos ensaios isotérmicos, os efeitos da pressão e do tratamento acústico são aplicados simultaneamente.

**Tabela 4.6 – Parâmetros utilizados no ensaio com aplicação indireta dos ultrassons.**

Ensaio	Parâmetros do ensaio com aplicação contínua de ultrassons			
	Pressão		Ultrassons	
	<i>Pressão (MPa)</i>	<i>Tempo (s)</i>	<i>Ti (°C)</i>	<i>Tempo (s)</i>
6	10	30	640	30

Devido a problemas técnicos com o grampo de aperto da coquilha e com a unidade de ultrassons destinada ao processamento contínuo, foi impossível a realização dos restantes ensaios programados para o processamento contínuo.

As temperaturas foram medidas com dois equipamentos distintos durante os ensaios. Foi utilizado o controlo próprio do forno, que possui um sistema de aquisição de temperatura bastante eficaz. Simultaneamente, foi utilizado um sistema de termopares para assegurar a correta medição da temperatura. As temperaturas foram controladas em todos os ensaios apenas até ao momento do vazamento, uma vez que a configuração experimental impossibilitou o controlo durante o arrefecimento e aplicação da pressão.

### 4.3.3. Condução dos ensaios

Em todos os ensaios efetuados, as cargas foram fundidas a 700°C e mantidas a essa temperatura durante 30 minutos para garantir a homogeneização do banho. Após esta fase, foi realizado o procedimento de desgaseificação ultrassónica a 680°C durante 60 segundos.

Nos ensaios com tratamento isotérmico do banho (no cadinho), a temperatura foi reduzida até aos valores definidos para o vazamento na Tabela 4.5. Durante o espaço temporal de arrefecimento do banho de 680°C para a temperatura pretendida, o radiador acústico foi imerso no banho para pré-aquecimento, após o qual se deu início ao fornecimento de energia acústica, durante o tempo e às temperaturas especificadas na Tabela 4.5. Após o tratamento, a liga foi vazada para a moldação metálica, pré-aquecida a 300°C, na qual foi aplicada a pressão, de acordo com os valores da Tabela 4.5.

No ensaio com tratamento indireto e contínuo, a transmissão da energia acústica foi efetuada através de uma ligação roscada entre o *waveguide* e o conjunto de grampos que aperta a coquilha. Nesta versão do processo, após a diminuição da temperatura até  $640\pm 5^{\circ}\text{C}$ , foi efetuado o vazamento para a coquilha, já com o fornecimento de energia acústica ligado. Após o vazamento foi efetuada aplicação da pressão de acordo com os valores de tempo e intensidade indicados na Tabela 4.6.

#### 4.4. Técnicas de caracterização

Após a obtenção das amostras, estas foram cortadas (sempre em pontos equivalentes) e polidas para serem posteriormente caracterizadas. O procedimento de polimento é um processo que tem como objetivo tornar a superfície a analisar espelhada e sem qualquer tipo de risco. Inicialmente, elimina-se a deformação causada pela operação de corte através de um desbaste com lixas de SiC com granulometria de #180. O polimento é depois realizado recorrendo a lixas de SiC com granulometrias gradualmente mais finas (#600, #1200, #2500, #4000). Seguidamente, é efetuado um polimento mais fino, com panos de  $1\mu\text{m}$ . Posteriormente, as amostras são imersas em água destilada e limpas com recurso a um equipamento de limpeza ultrassónica. A operação é finalizada com acabamento manual com sílica coloidal e com ataque químico – solução de 0,5% HF, para revelar a microestrutura.

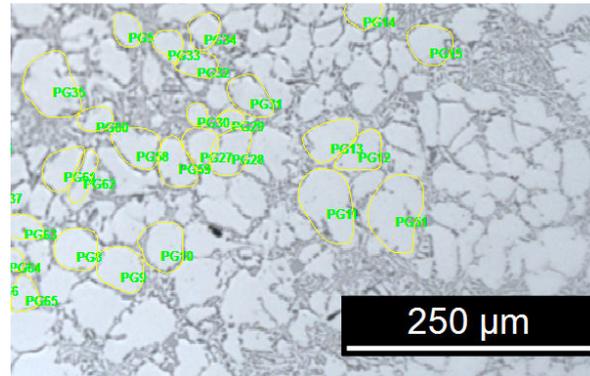
Para a caracterização microestrutural das amostras obtidas foi utilizado um microscópio ótico – *LEICA DM 2500M*, representado na Figura 4.5. Este equipamento encontra-se nas instalações do DEM e está equipado com ligação a um computador para aquisição de imagens.



**Figura 4.5 – Microscópio ótico com capacidade de gravação das imagens observadas.**

Foram analisadas as amostras com ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x, permitindo assim a análise de diferentes pormenores. As ampliações menores, 50x e 100x, foram utilizadas para analisar o tamanho médio de grão  $\alpha\text{-Al}$ , circularidade dos grãos  $\alpha\text{-Al}$ , bem como o espaçamento

interdendrítico primário e secundário. As maiores ampliações foram utilizadas para analisar a morfologia do silício e dos compostos intermetálicos. O processamento das imagens realizou-se com recurso ao *software Image Pro Plus*, o qual permite determinar a quantidade de *pixels* de uma determinada área ou perímetro e convertê-los em unidades métricas de acordo com a calibração efetuada, tal como exemplificado na Figura 4.6.



**Figura 4.6 – Exemplo do processamento das micrografias no *software Image Pro Plus*.**

Para cada amostra foram recolhidos 5 campos de imagem, em cada um dos quais foram selecionados aleatoriamente 50 a 100 grãos. Posteriormente, para cada campo, foi calculado o diâmetro médio de grão e a circularidade, através das equações (4.1) e (4.2). Para cada uma destas variáveis, foi, de seguida, calculado o valor médio, desvio-padrão e erro associado das medições efetuadas em cada amostra, de acordo com as equações (4.3), (4.4) e (4.5.)

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (4.1)$$

Onde  $d$  representa o diâmetro médio do grão  $\alpha$ -Al e  $A$  a área do grão.

$$R_n = \frac{4 \times A \times \pi}{P^2} \quad (4.2)$$

Onde  $R_n$  representa a circularidade,  $A$  a área e  $P$  o perímetro do grão  $\alpha$ -Al.

As medições do tamanho de grão das microestruturas foram efetuadas de acordo com os procedimentos descritos na Norma ASTM E112 [42].

Foi também realizada a determinação da quantidade de poros nas amostras, dado que, teoricamente, a fração de área de poros num determinado plano de análise equivale à sua fração no volume total da amostra. O procedimento é semelhante ao da determinação do tamanho médio de grão. No *software Image Pro Plus* determina-se a área de poros em relação à área total da amostra. Para cada ensaio foram analisados 5 campos independentes e, posteriormente, foram calculados o

valor médio, desvio-padrão e erro associado. Simultaneamente, foi efetuada uma análise da densidade das amostras, através da determinação do volume e massa das mesmas.

(4.3)

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{N}$$

(4.4)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

(4.5)

$$\Delta x = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

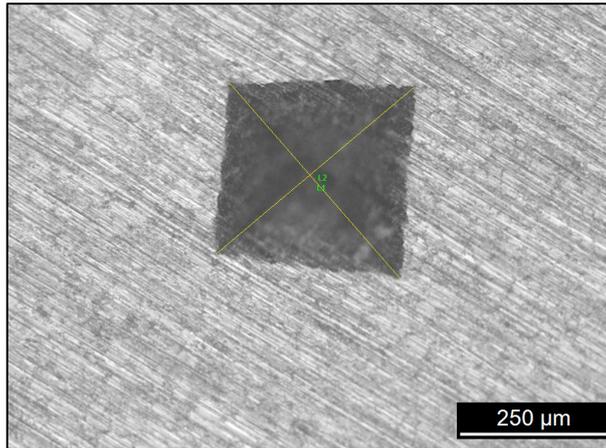
Onde  $\bar{x}$  representa a média, N o numero de medições,  $\sigma$  o desvio padrão e  $\Delta x$  o erro associado.

A medição das durezas foi efetuada com o auxílio do equipamento representado na Figura 4.7 – modelo *DURASCAN* da marca *EMCOTEST*, utilizado para a realização das indentações – e com o microscópio ótico para medição das diagonais da indentação.



**Figura 4.7 – Equipamento para a realização das indentações do ensaio de durezas – Modelo *DURASCAN* da marca *EMCOTEST*.**

O procedimento para determinação das durezas começa com o polimento das amostras nas lixas de #180 e #600. De seguida, são efetuadas as indentações, 8 por amostra, espaçadas de forma a formarem uma cruz. Cada indentação foi efetuada com a carga de 10kgf durante 15s. Após as indentações, é necessário recorrer ao microscópio ótico para a obtenção das micrografias das mesmas. Nessas micrografias são medidas as diagonais de cada indentação, recorrendo ao *software Image Pro Plus*, como exemplificado na Figura 4.8.



**Figura 4.8 – Exemplo da medição das diagonais de uma indentação para medição da dureza.**

Através da equação (4.6 e com base nos valores das diagonais, são calculados os valores da dureza em Vickers. Estes são representados por  $\frac{W}{HVZ/X}$ , no qual W representa o valor da dureza Vickers, Z a carga aplicada e X a duração da aplicação da carga. Finalmente, são calculados os valores da média, desvio-padrão e erro associado para cada amostra.

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F \sin(136/2)}{d^2} \approx 1,8544 \times \frac{F}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2} \quad (4.6)$$

## **CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

O estudo realizado neste projeto tem como objetivo avaliar o potencial da conjugação de dois processos distintos (tratamento acústico do banho metálico e solidificação sob pressão) na alteração das **características microestruturais e mecânicas** em ligas de alumínio. O estudo decorreu conforme descrito no Capítulo 4, sendo aqui apresentados e discutidos os resultados experimentais, de acordo com a seguinte sequência:

1. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe em bruto de fundição;
2. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito simples de *Squeeze Casting*;
3. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada apenas com tratamento acústico;
4. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito conjugado de *Squeeze Casting* e tratamento acústico isotérmico antes do vazamento;
5. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito conjugado de *Squeeze Casting* e tratamento acústico contínuo durante a fase de pressão (processo indireto).

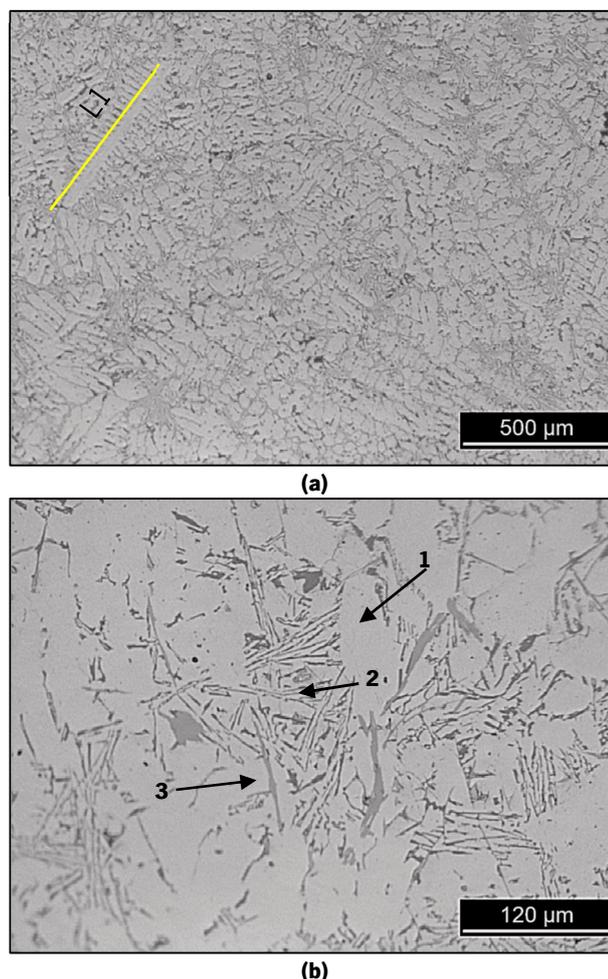
Sempre que possível, a caracterização das amostras nos diferentes tipos de processamento será realizada segundo os seguintes pontos:

- a. Análise descritiva dos parâmetros relevantes;
- b. Análise quantitativa dos parâmetros, quando aplicável;
- c. Análise comparativa dos resultados e discussão.

Depois de caracterizados os ensaios, será efetuada uma análise do efeito dos vários parâmetros de processamento nas diferentes características em análise: **Matriz  $\alpha$ -Al; partículas de silício eutético; compostos intermetálicos; porosidades; densidade e dureza.**

## 5.1. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe em bruto de fundição

A microestrutura do ensaio realizado em bruto de fundição (*as cast*) é apresentada na Figura 5.1.



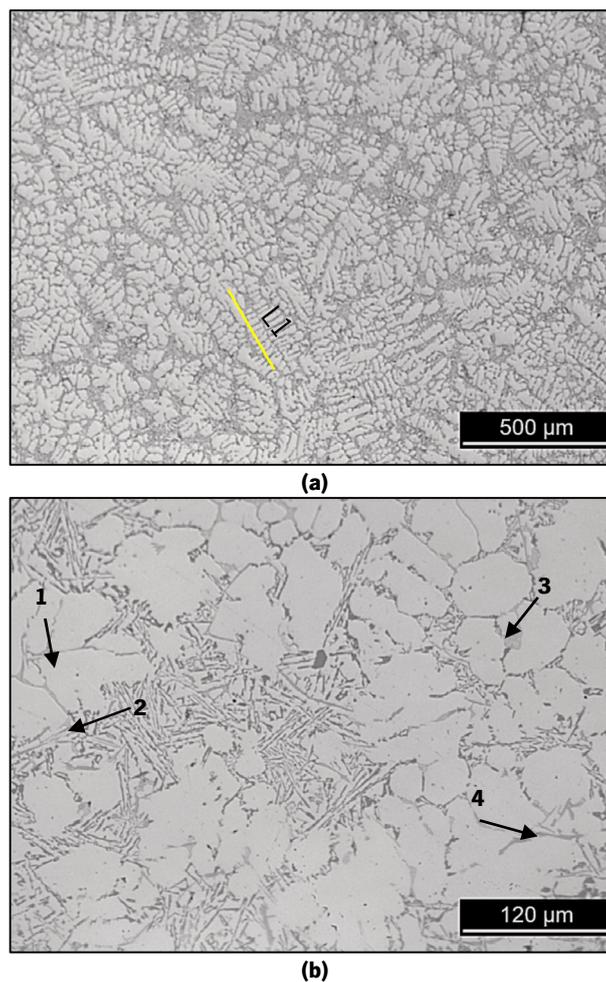
**Figura 5.1 – Microestrutura do ensaio realizado em bruto de fundição; a – ampliação 50x, b – ampliação 200x; 1 – Matriz  $\alpha$ -Al; 2 – Silício Eutético; 3 – Agulha  $\beta$ -Al<sub>x</sub>FeSi.**

A microestrutura apresenta uma fase primária  $\alpha$ -Al (1) muito heterógena, na qual é dominante a forma colunar dendrítica. Contudo, é possível identificar alguns grãos não dendríticos, situação característica dos vazamentos por gravidade em moldação permanente. Em relação às partículas de silício (2), estas nucleiam nos espaços interdendríticos ou intergranulares e apresentam uma forma acicular grosseira com comprimento muito heterogêneo. É de fácil reconhecimento a formação de alguns elementos intermetálicos, como, por exemplo, as agulhas  $\beta$ -Al<sub>x</sub>FeSi (3), nocivos à integridade mecânica da liga, devido às concentrações de tensões que provocam, à fraca ligação com a matriz e pelo facto de poderem atuar como uma malha, provocando a formação de rechupes [43]. A fase  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> é muito heterogênea neste tipo de processamento, pelo que não aparece em todas as zonas, nem é facilmente identificável.

O comprimento dendrítico médio (L1) é, aproximadamente, 500  $\mu\text{m}$ , com espaçamento médio (DAS) de aproximadamente 400  $\mu\text{m}$  e com um espaçamento entre os braços secundários (SDAS) aproximado de 31  $\mu\text{m}$ .

## 5.2. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito simples de *Squeeze Casting*

A microestrutura do ensaio realizado com o efeito simples de pressão (5MPa) durante a solidificação é apresentado na Figura 5.2.



**Figura 5.2 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito simples de pressão (5MPa) durante a solidificação. a - ampliação 50x, b - ampliação 200x; 1 – Matriz  $\alpha$ -Al; 2 – Silício Eutético; 3 – Elemento intermetálico poliédrico  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>; 4 – Agulha  $\beta$ -Al<sub>x</sub>FeSi.**

A microestrutura apresenta uma fase primária  $\alpha$ -Al (1) heterogênea, onde é dominante a forma colunar dendrítica, mas também é possível identificar alguns grãos não dendríticos. O silício eutético (2) encontra-se numa forma acicular, mas ligeiramente modificado. As partículas de silício são mais finas e menos compridas do que as do ensaio em bruto de fundição, confirmando-se as previsões da literatura para ligas Al-Si processadas por *Squeeze Casting* – partículas de silício fibrosas [10]. Em

relação aos elementos intermetálicos, são identificáveis as agulhas da fase  $\beta$  (3) e elementos intermetálicos poliédricos da fase  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> (4).

O comprimento dendrítico médio (L1) é, aproximadamente, 300  $\mu\text{m}$ , com espaçamento médio (DAS) de aproximadamente 250  $\mu\text{m}$  e com um espaçamento entre os braços secundários (SDAS) aproximado de 25  $\mu\text{m}$ . Segundo os testes de dureza realizados, a amostra deste ensaio apresenta uma dureza de 87 Vickers. Foi também averiguada a fração de porosidades por microscopia ótica e calculada a densidade, pela determinação do volume e massa da amostra. Na Tabela 5.1 estão representados os dados da análise quantitativa deste ensaio.

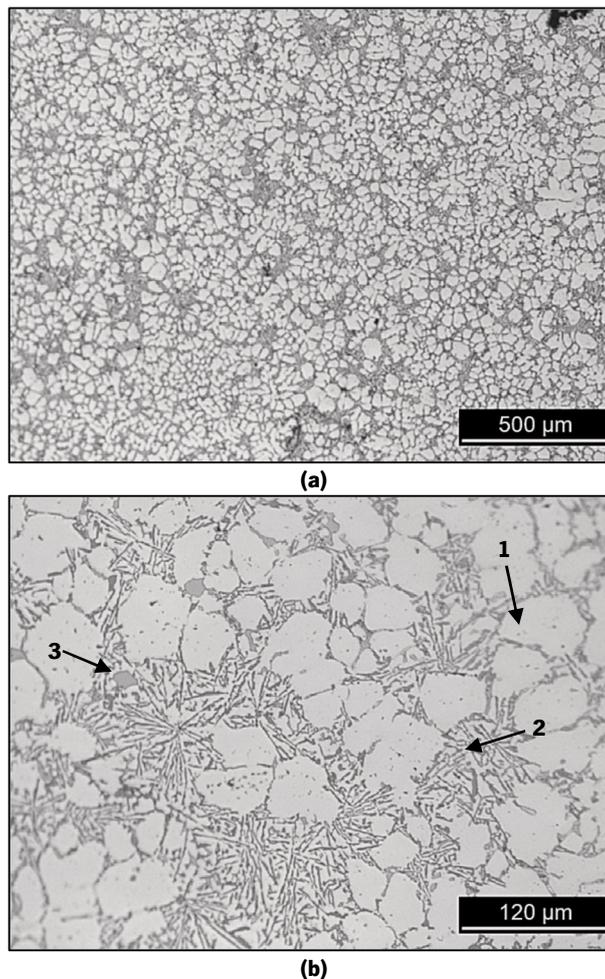
**Tabela 5.1 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio realizado apenas com aplicação de pressão durante a solidificação.**

	<b>Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Erro associado</b>
<i>Dureza (HV)</i>	87	4,39	0,549
<i>DAS (<math>\mu\text{m}</math>)</i>			250
<i>SDAS (<math>\mu\text{m}</math>)</i>			25
<i>Porosidade (fração de área por MO)</i>			0,069%
<i>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>			2,708 (1)

(1) Densidade teórica da liga 2,74

### 5.3. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada apenas com tratamento acústico

Na Figura 5.3 está apresentada a microestrutura relativa ao ensaio realizado apenas com tratamento acústico. O processamento acústico realizou-se isotermicamente à temperatura de 620°C durante 60 segundos, à frequência média de  $20 \pm 0,25$  Hz e com uma potência elétrica de 300 W.



**Figura 5.3 – Microestrutura do ensaio realizado com tratamento acústico isotérmico a 620°C. a - ampliação 50x, b - ampliação 200x; 1 – Matriz  $\alpha$ -Al; 2 – Silício Eutético; 3 – Elemento intermetálico poliédrico  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>.**

A fase  $\alpha$ -Al (1) encontra-se claramente afinada, apresentando a matriz uma forma predominantemente globular, embora nalgumas zonas exista incidência de rosetas. A matriz é bastante homogênea. Em relação às partículas de silício (2), verifica-se que ocorreu modificação parcial do silício eutético apenas com tratamento acústico. No que concerne aos elementos intermetálicos, é interessante notar a predominância dos elementos poliédricos da fase  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> (3) em detrimento da escrita chinesa, bem como a ausência das agulhas longas e espessas da fase  $\beta$ -Al<sub>x</sub>FeSi.

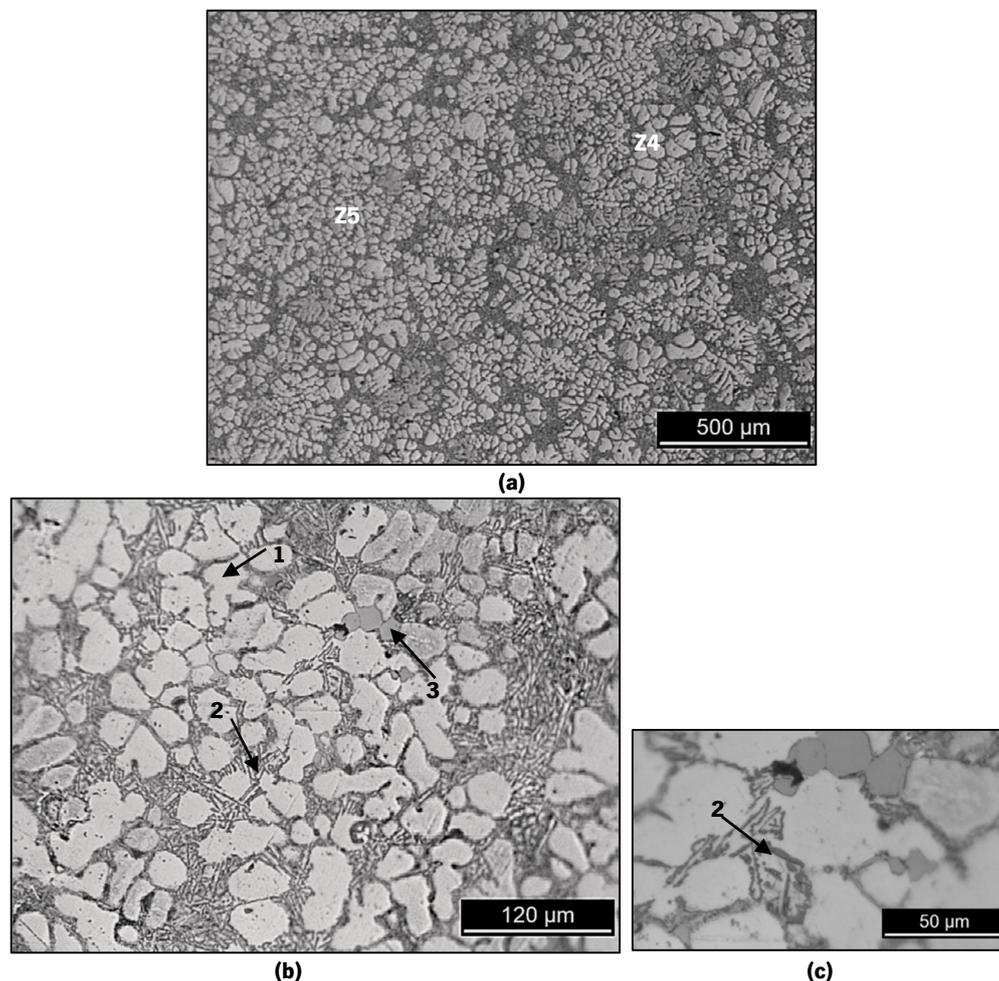
Quantitativamente, foram determinados os valores do diâmetro médio e circularidade média deste ensaio, segundo o método descrito na secção 4.4. O diâmetro médio de grão foi aproximadamente 48  $\mu\text{m}$  e a circularidade média 0,843. Segundo os testes de dureza realizados, a amostra deste ensaio apresenta uma dureza de 88 Vickers. Foi também averiguada a fração de porosidades por microscopia ótica e calculada a densidade, pela determinação do volume e massa das amostras. Na Tabela 5.2 estão representados os dados da análise quantitativa deste ensaio.

**Tabela 5.2 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio apenas com tratamento acústico isotérmico (620°C).**

	<b>Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Erro associado</b>
<i>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	48,387	13,837	1,807
<i>Circularidade</i>	0,843	0,106	0,014
<i>Dureza (HV)</i>	88	2,99	0,374
<i>Porosidade (fração de área por MO)</i>			0,271%
<i>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>			2,620(1)
(1) Densidade teórica da liga 2,74			

#### 5.4. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito conjugado de *Squeeze Casting* e tratamento acústico isotérmico antes do vazamento

Neste estudo foi averiguado o resultado do efeito conjugado da aplicação de pressão durante o arrefecimento e tratamento acústico do banho metálico. Este ponto em particular foca-se no tratamento isotérmico do banho metálico antes do vazamento e aplicação de pressão. Foram efetuados ensaios com três conjuntos de parâmetros diferentes, como descrito na Tabela 4.5. Foram testados dois níveis de pressão, 5MPa e 10MPa, e duas temperaturas de tratamento e vazamento distintas, 620°C e 640°C. Na Figura 5.4 está representada a microestrutura obtida do ensaio **com 5MPa e tratamento acústico isotérmico a 620°C (ensaio 3)**.



**Figura 5.4 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (5MPa) e tratamento acústico isotérmico a 620°C. a - ampliação 50x, b - ampliação 200x; c - ampliação 500x; 1 – Matriz  $\alpha$ -Al; 2 – Silício Eutético; 3 – Elemento intermetálico poliédrico  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>; Z4 – Zona de grão maior; Z5 – Zona de grão menor.**

A fase  $\alpha$ -Al (1) encontra-se claramente afinada, sendo a matriz ligeiramente homogénea, composta por uma mistura de rosetas e grãos globulares. Existem zonas com incidência de grãos de tamanhos diferentes; exemplos evidentes são as zonas Z4 e Z5. É evidente o grau de modificação das

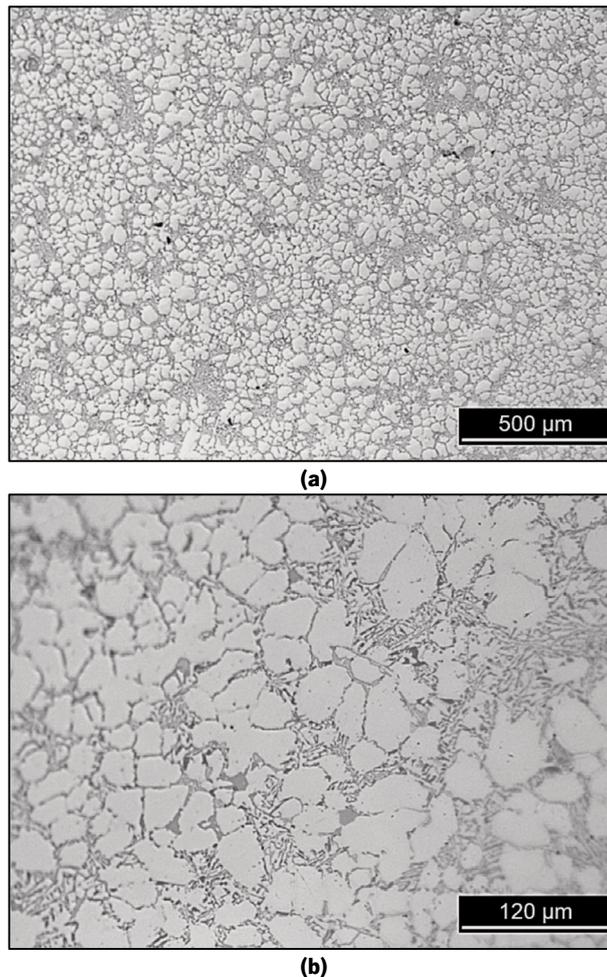
partículas de silício eutético (2). Em comparação com os ensaios de controlo (*as cast*, só com pressão e só com tratamento acústico), as partículas de silício eutético parecem ser mais pequenas e arredondadas. Em relação aos elementos intermetálicos, é interessante notar a predominância dos elementos poliédricos da fase  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{MnFe})_3\text{Si}_2$  (3) sobre a escrita chinesa e a ausência das agulhas da fase  $\beta\text{-Al}_x\text{FeSi}$ , pelos motivos descritos no ponto 5.6.3.

Quantitativamente, foram determinados os valores do diâmetro médio e circularidade média deste ensaio, segundo o método descrito na secção 4.4. O diâmetro médio de grão foi aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  e a circularidade média 0,81. Segundo os testes de dureza realizados, a amostra deste ensaio apresenta uma dureza de 86 Vickers. Foi também averiguada a fração de porosidades por microscopia ótica e calculada a densidade, pela determinação do volume e massa das amostras. Na Tabela 5.3 estão representados os dados da análise quantitativa deste ensaio.

**Tabela 5.3 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico isotérmico (620°C) e pressão durante a solidificação (5MPa).**

	<b>Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Erro associado</b>
<i>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	50,434	17,794	2,197
<i>Circularidade</i>	0,813	0,094	0,012
<i>Dureza (HV)</i>	86	4,34	0,542
<i>Porosidade (fração de área por MO)</i>			0,137%
<i>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>			2,704
(1) Densidade teórica da liga 2,74			

Na Figura 5.5 está representada a microestrutura obtida do ensaio com **10MPa de pressão aplicada e tratamento acústico isotérmico a 620°C (ensaio 4)**. Tal como no ensaio anterior, é evidente o sucesso da afinação do grão da matriz  $\alpha\text{-Al}$ . A homogeneidade da matriz aumentou com o aumento da pressão. A modificação do silício eutético também é evidente em ambos os ensaios, estando as partículas mais pequenas, em comparação com os ensaios de controlo. No que se refere aos elementos intermetálicos, a análise é em tudo semelhante ao ensaio anterior. Nota-se a predominância dos elementos poliédricos da fase  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{MnFe})_3\text{Si}_2$  sobre a escrita chinesa e a ausência das agulhas da fase  $\beta\text{-Al}_x\text{FeSi}$ , pelos motivos descritos no ponto 5.6.3.



**Figura 5.5 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (10MPa) e tratamento acústico isotérmico a 620°C. a - ampliação 50x, b - ampliação 200x.**

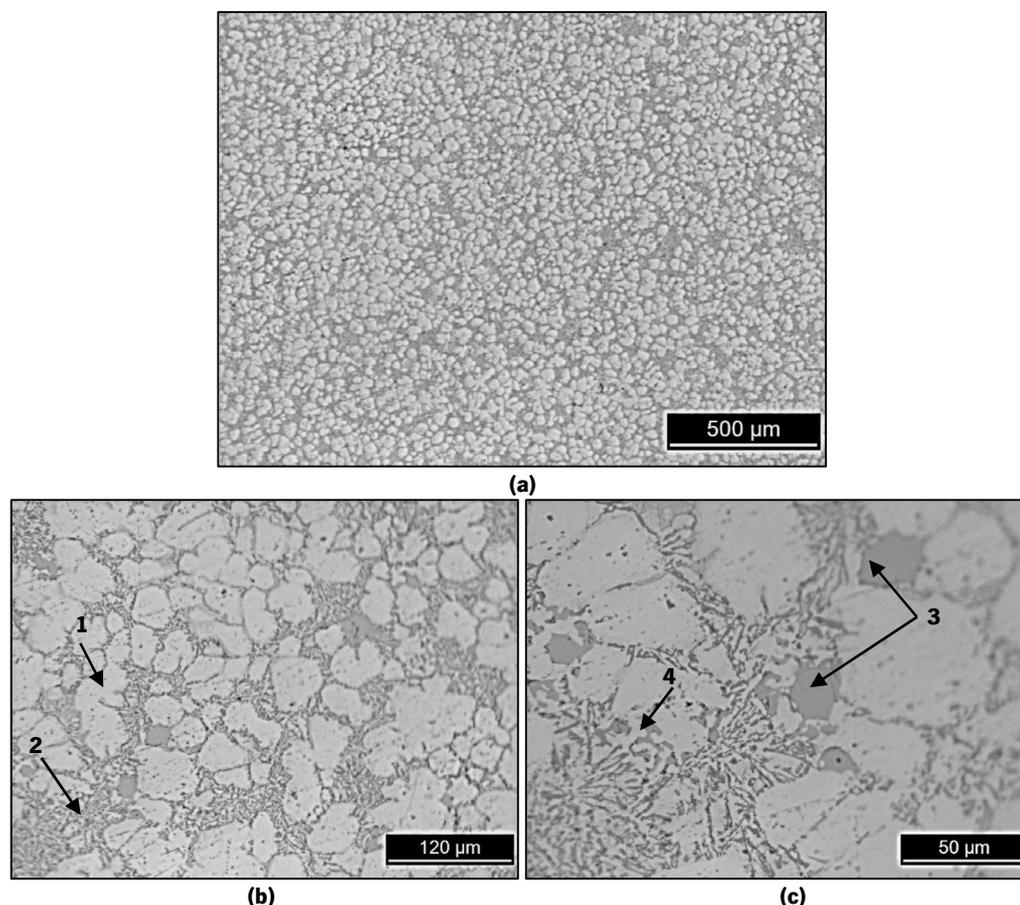
Quantitativamente, foram determinados os valores do diâmetro médio e circularidade média deste ensaio, segundo o método descrito na secção 4.4. O diâmetro médio de grão foi aproximadamente 44  $\mu\text{m}$  e a circularidade média 0,81. Segundo os testes de dureza realizados, a amostra deste ensaio apresenta uma dureza de 93 Vickers. Foi também averiguada a fração de porosidades por microscopia ótica e calculada a densidade, pela determinação do volume e massa das amostras. Na Tabela 5.4 estão representados os dados da análise quantitativa deste ensaio.

**Tabela 5.4 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico isotérmico (620°C) e pressão durante a solidificação (10MPa).**

	<b>Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Erro associado</b>
<i>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	44	12,6	1,3
<i>Circularidade</i>	0,819	0,072	0,009
<i>Dureza (HV)</i>	93	4,17	0,52
<i>Porosidade (fração de área por MO)</i>		0,073%	
<i>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>		2,693	

(1) Densidade teórica da liga 2,74

O ensaio cuja micrografia está representada na Figura 5.6 foi efetuado nas mesmas condições de pressão que o anterior (**10MPa**), mas o **tratamento acústico isotérmico foi realizado a 640°C (ensaio 5)**.



**Figura 5.6 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (10MPa) e tratamento acústico isotérmico a 640°C. a - ampliação 50x, b - ampliação 200x, c - ampliação 500x; 1 – Matriz  $\alpha$ -Al; 2 – Silício Eutético; 3 – Elemento intermetálico poliédrico  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>; 4 – Elemento intermetálico parcialmente na forma de escrita chinesa  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>.**

A micrografia apresenta uma estrutura homogênea, com grãos finos, sem qualquer vestígio de dendrites, mas com alguma incidência de rosetas. Os grãos são na sua maioria globulares, sendo notório o sucesso do processo de afinação de grão. É interessante verificar o estado de modificação do silício eutético; para tal averiguação foi necessário recorrer a uma ampliação maior do que nos ensaios anteriores (Figura 5.6c). É evidente o sucesso do processo de modificação, visível pelo tamanho reduzido e forma arredondada das partículas de silício. Relativamente aos elementos intermetálicos, neste ensaio é menos evidente a predominância dos elementos poliédricos sobre a escrita chinesa da fase  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, mas é notória a ausência das agulhas de fase  $\beta$ -Al<sub>x</sub>FeSi, pelas razões descritas na secção 5.6.3.

Quantitativamente, foram determinados os valores do diâmetro médio e circularidade média deste ensaio, segundo o método descrito na secção 4.4. O diâmetro médio de grão foi aproximadamente 43  $\mu\text{m}$  e a circularidade média 0,82. Segundo os testes de dureza realizados, a amostra deste ensaio apresenta uma dureza de 80 Vickers. Foi também calculada a densidade, pela determinação do volume e massa das amostras. Na Tabela 5.5 estão representados os dados da análise quantitativa deste ensaio.

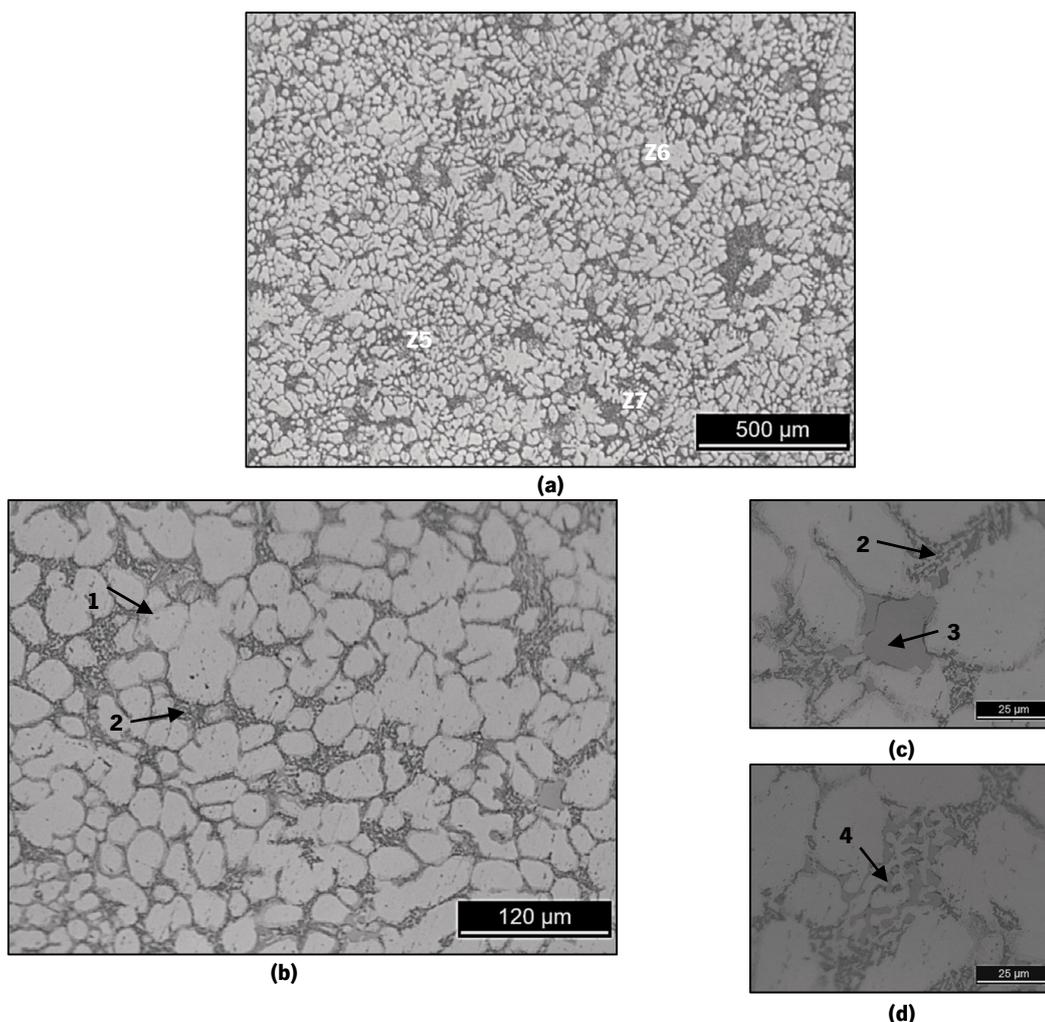
**Tabela 5.5 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico isotérmico (640°C) e pressão durante a solidificação (10MPa).**

	<b>Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Erro associado</b>
<i>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	43	14,3	1,5
<i>Circularidade</i>	0,823	0,088	0,010
<i>Dureza (HV)</i>	80	4,65	0,58
<i>Porosidade (fração de área por MO)</i>			(1)
<i>Densidade</i>			2,715

(1) Impossível de verificar nas micrografias obtidas.  
(2) Densidade teórica da liga 2,74

## 5.5. Caracterização da liga AlSi9Cu3Fe processada pelo efeito conjugado de *Squeeze Casting* e tratamento acústico contínuo durante a fase de pressão (processo indireto)

Na Figura 5.7 está representada a microestrutura obtida do ensaio com **10MPa de pressão aplicada e tratamento acústico contínuo (ensaio 6)**.



**Figura 5.7 – Microestrutura do ensaio realizado com o efeito conjugado de pressão (10MPa) e tratamento acústico contínuo durante a solidificação. a - ampliação 50x, b - ampliação 200x; c, d - ampliação 1000x; 1 – Matriz  $\alpha$ -Al; 2 – Silício Eutético extremamente modificado; 3 – Elemento intermetálico poliédrico  $\alpha$ -Al15(MnFe)3Si2; 4 – Elemento intermetálico parcialmente na forma de escrita chinesa  $\alpha$ -Al15(MnFe)3Si2; Z5 – Zona de grãos globulares equiaxiais; Z6 – Zona de grãos em forma de roseta; Z7 – Grãos formados por fragmentação dendrítica.**

Pelas micrografias, verifica-se que a amostra apresenta uma estrutura fina mas heterogénea, onde existem zonas com incidência de grãos finos, globulares e equiaxiais (zona 5), outras onde são prevalentes os grãos em forma de roseta (zona 6) e ainda zonas com grãos cuja origem parece ser a fragmentação dendrítica (zona 7), tal como descrito na literatura por Puga em [8]. O estado das partículas de silício eutético é muito interessante, tendo sido necessário recorrer à ampliação 1000x

para verificar a sua forma. Em relação aos elementos intermetálicos, neste ensaio verifica-se uma coexistência dos elementos poliédricos da fase  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> com elementos com forma de escrita chinesa da mesma fase. No entanto, continua a ser notória a ausência das agulhas da fase  $\beta$ -Al<sub>x</sub>FeSi, pelas razões descritas na secção 5.6.3.

Quantitativamente, foram determinados os valores do diâmetro médio e circularidade média deste ensaio, segundo o método descrito na secção 4.4. O diâmetro médio de grão foi aproximadamente 48  $\mu$ m e a circularidade média 0,79. Segundo os testes de dureza realizados, a amostra deste ensaio apresenta uma dureza de 73 Vickers. Foi também calculada a densidade, pela determinação do volume e massa das amostras. Na Tabela 5.6 estão representados os dados da análise quantitativa deste ensaio.

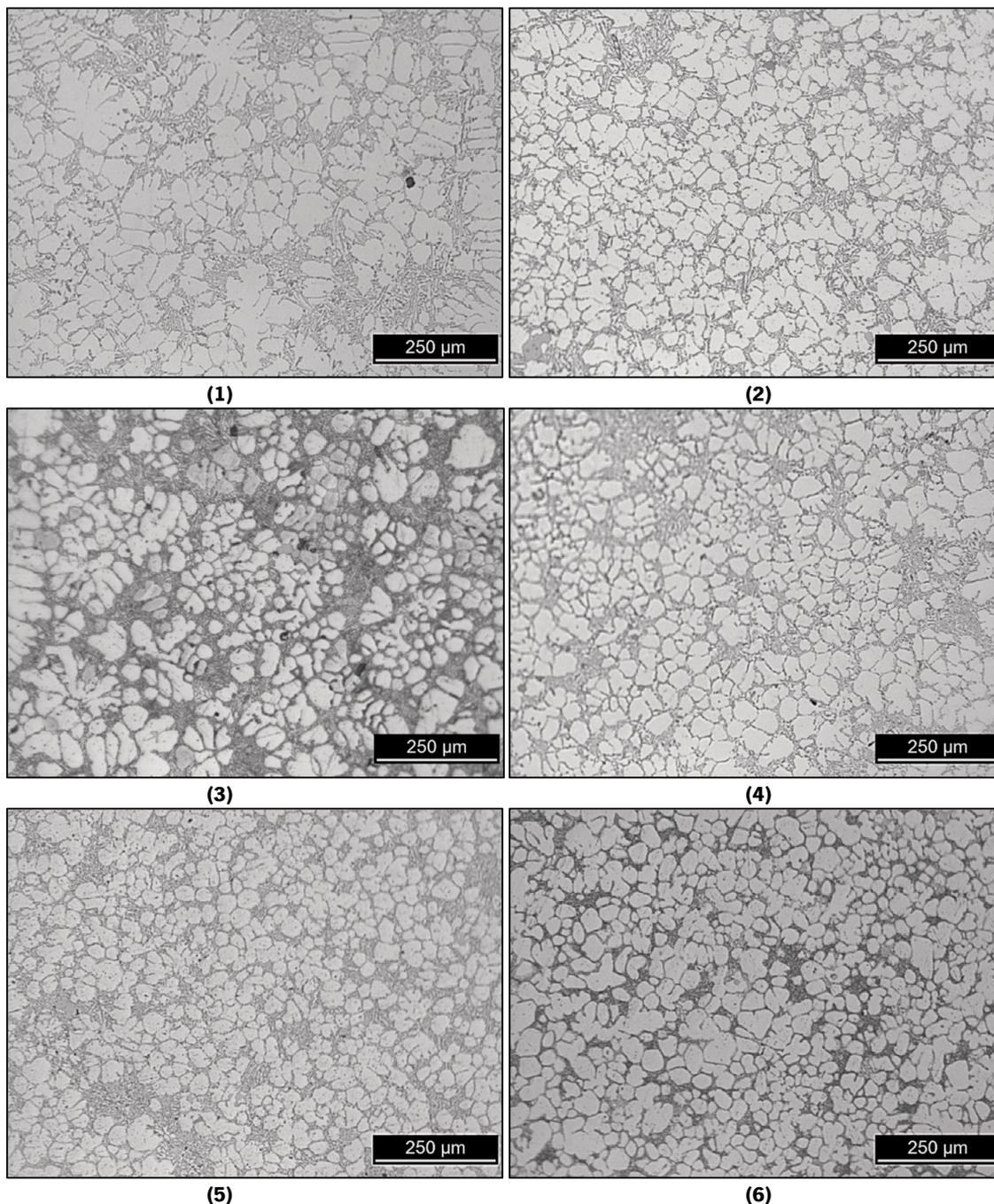
**Tabela 5.6 – Dados quantitativos da análise microestrutural do ensaio com tratamento acústico contínuo e pressão (10MPa) durante a solidificação.**

	<b>Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Erro associado</b>
<i>Diâmetro (<math>\mu</math>m)</i>	48	18,8	2,1
<i>Circularidade</i>	0,791	0,124	0,014
<i>Dureza (HV)</i>	73	3,74	0,467
<i>Porosidade (fração de área por MO)</i>			(1)
<i>Densidade</i>			2,700
(1) Impossível de verificar nas micrografias obtidas.			
(2) Densidade teórica da liga 2,74			

## 5.6. Discussão dos Resultados

### 5.6.1. Análise da afinação da matriz $\alpha$ -Al

Na Figura 5.8 estão representadas as microestruturas de todos os ensaios para análise e discussão da afinação do tamanho de grão. Todas as micrografias estão com ampliação de 100x.



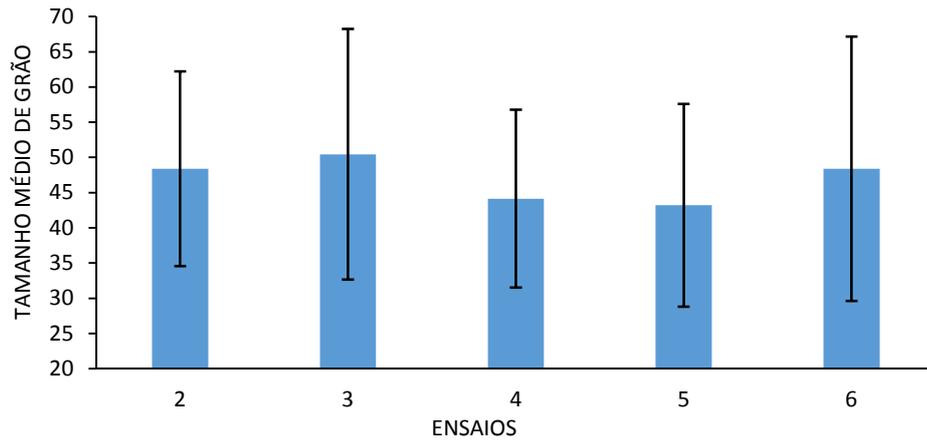
**Figura 5.8 – Micrografias de todas as amostras na ampliação 100x. 1 – 5MPa de pressão durante a solidificação; 2 – tratamento acústico isotérmico (620°C); 3 – 5MPa de pressão e tratamento acústico isotérmico (620°C); 4 – 10MPa de pressão e tratamento acústico isotérmico (620°C); 5 – 10MPa de pressão e tratamento acústico isotérmico (640°C); 6 – 10MPa de pressão e tratamento acústico contínuo durante a solidificação.**

Pela análise das micrografias da Figura 5.8 conclui-se que o processamento da liga AlSi9Cu3Fe pela conjugação de aplicação de pressão durante a solidificação e tratamento acústico tem um efeito positivo na microestrutura da liga. Este efeito torna-se mais claro quando as microestruturas são comparadas com as do ensaio realizado em bruto de fundição (ensaio 0). Mais especificamente, no que se refere à matriz  $\alpha$ -Al, as duas tecnologias causam efeitos distintos. A solidificação sob pressão parece causar uma redução no tamanho e espaçamento das dendrites, apesar de aumentar a sua incidência. Isto deve-se ao aumento do coeficiente de transferência de calor e ao efeito *Clausius-Clapeyron* [18]. No tratamento acústico, as estruturas dendríticas são completamente eliminadas, dando lugar a uma microestrutura globular e relativamente homogênea, cujo grau de afinação depende do tipo de tratamento e da temperatura a que é realizado [8]. Os dados quantitativos relativos à matriz  $\alpha$ -Al estão resumidos na Tabela 5.7.

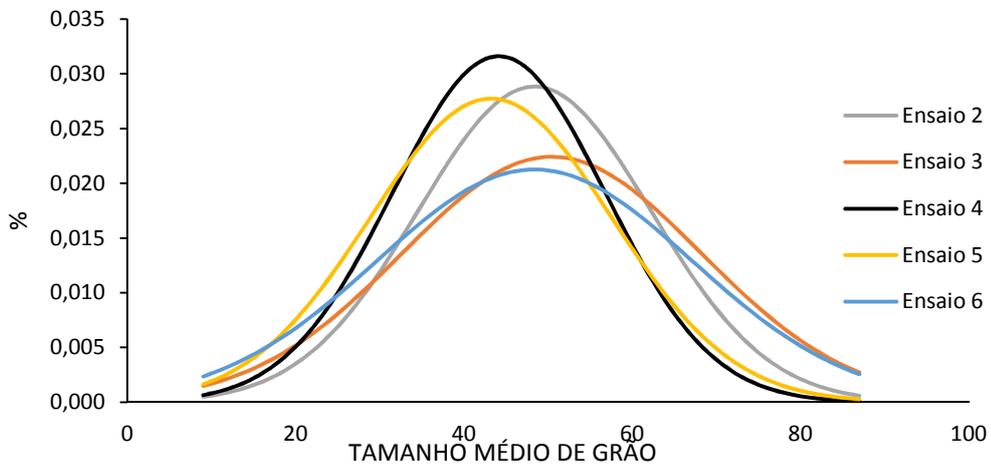
**Tabela 5.7 – Síntese dos dados quantitativos relativos à matriz.**

	<b>Diâmetro Médio (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro Associado</b>	<b>Circularidade Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Erro Associado</b>
0				$\alpha$ -Al Dendrítico		
1				$\alpha$ -Al Dendrítico		
2	48,3	13,8	1,8	0,843	0,106	0,014
3	50,4	17,7	2,2	0,813	0,094	0,012
4	44,1	12,6	1,4	0,819	0,072	0,009
5	43,2	14,3	1,6	0,823	0,088	0,010
6	48,3	18,7	2,1	0,791	0,124	0,014

**Os dados parecem indicar uma diminuição ligeira do tamanho médio de grão com a conjugação das duas tecnologias.** Essa diminuição verifica-se para os ensaios efetuados com 10 MPa, mas não se verifica para o ensaio com 5MPa, pelo que seriam necessários mais testes para validar as conclusões. É interessante verificar a progressão entre os ensaios 3, 4 e 5. Os dados recolhidos nesses ensaios parecem indicar uma ligeira redução do tamanho médio de grão com o aumento da pressão. Nos ensaios realizados com tratamento acústico isotérmico, o tamanho médio de grão passa de 50  $\mu\text{m}^2$  no ensaio 3 para aproximadamente 44  $\mu\text{m}^2$  nos ensaios 4 e 5. Embora a literatura aponte para um aumento do tamanho médio de grão em função do aumento da temperatura de tratamento acústico isotérmico [8], neste estudo, no qual foram conjugadas as duas tecnologias, o mesmo efeito não se verificou, conforme demonstrado pelos dados dos ensaios 4 e 5. Os dados quantitativos relativos ao diâmetro médio dos grãos  $\alpha$ -Al estão representados graficamente na Figura 5.9 e na Figura 5.10.



**Figura 5.9 – Gráfico relativo ao tamanho médio de grão nos diferentes ensaios.**



**Figura 5.10 – Distribuição do tamanho de grão nos diferentes ensaios.**

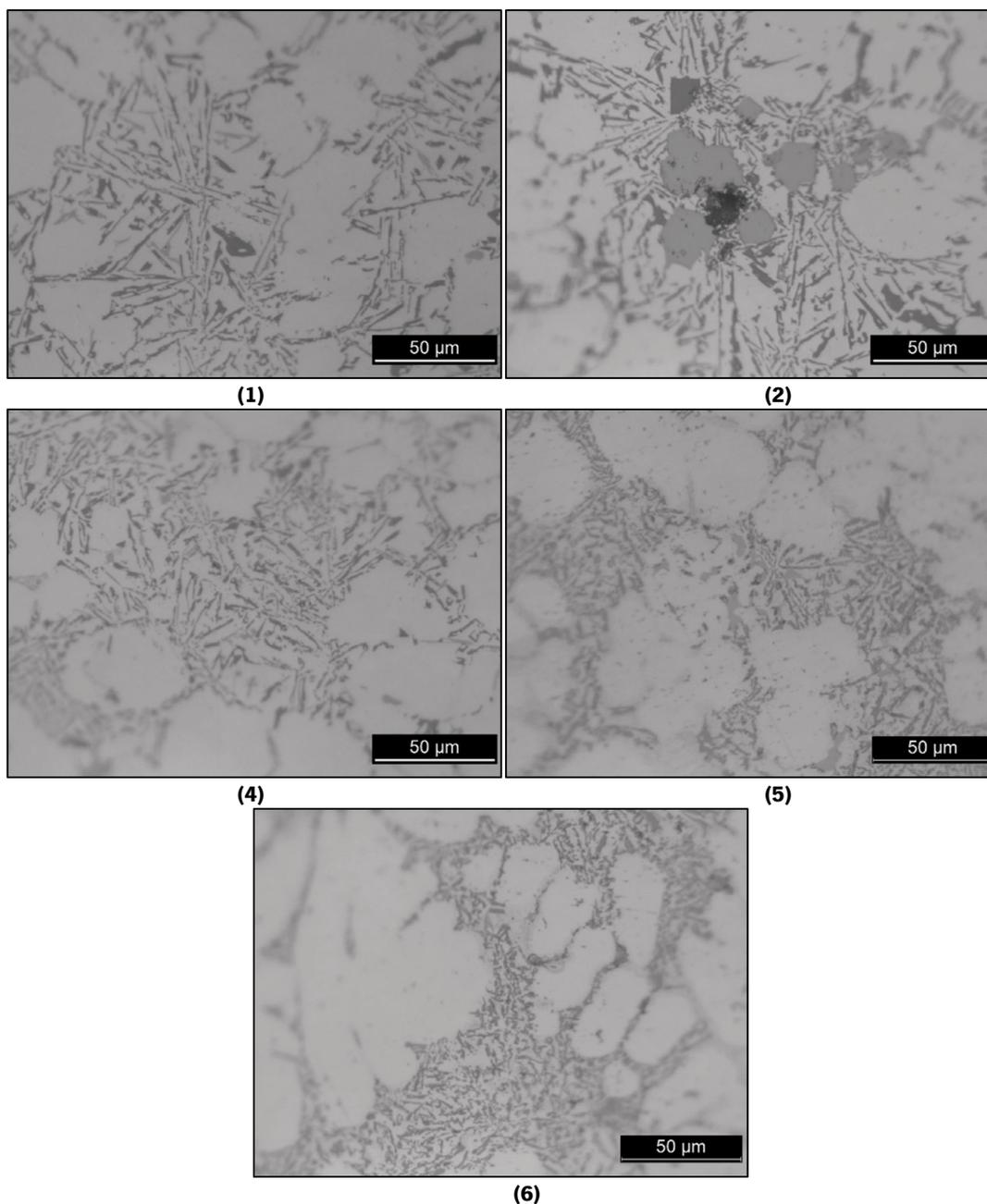
O desvio-padrão representa a homogeneidade dos grãos de  $\alpha$ -Al, sendo interessante verificar a evolução do mesmo. Com apenas tratamento acústico isotérmico, a matriz  $\alpha$ -Al apresenta zonas finas e equiaxiais e outras com maior incidência de pequenas rosetas. No ensaio 3, com a aplicação de 5MPa durante a solidificação, nota-se uma maior dispersão do tamanho de grão na matriz. Nos ensaios 4 e 5 (10 MPa) verifica-se o contrário, tendo a matriz uma homogeneidade semelhante ao ensaio no qual é apenas realizado tratamento acústico.

Os dados recolhidos no ensaio 6 (10 MPa de pressão aplicada e processamento acústico contínuo durante a solidificação) não são facilmente comparados com os outros ensaios, já que o tratamento acústico foi efetuado de forma distinta. É clara a presença de grãos formados quer por nucleação heterogênea, quer por fragmentação dendrítica. Com os ensaios realizados não é possível determinar o efeito real da conjugação da aplicação de pressão e tratamento contínuo.

Analisando os dados relativos à circularidade, estes parecem indicar que a aplicação de pressão dá origem a grãos menos globulares do que o simples tratamento acústico. Nos ensaios por tratamento isotérmico (3, 4 e 5), a explicação pode ser o aumento do coeficiente de transferência de calor, diminuindo o tempo que os grãos têm para se formar. No caso do tratamento acústico contínuo, pelo facto de os grãos serem formados por dois processos distintos (nucleação heterogénea e fragmentação dendrítica), a forma dos grãos tende a ser mais heterogénea, apresentando, por isso, uma circularidade média inferior.

## 5.6.2. Análise das partículas de silício

Na Figura 5.11 estão apresentadas micrografias representativas do estado das partículas de silício nos vários ensaios realizados.



**Figura 5.11 – Micrografias das partículas de silício nas ampliações 200x e 500x. 1 – 5MPa de pressão durante a solidificação; 2 – tratamento acústico isotérmico (620°C); 4 – 10MPa de pressão e tratamento acústico isotérmico (620°C); 5 – 10MPa de pressão e tratamento acústico isotérmico (640°C); 6 – 10MPa de pressão e tratamento acústico contínuo durante a solidificação.**

A análise realizada foi apenas qualitativa e, nesse sentido, podem ser tecidos alguns comentários. Comparando as microestruturas dos vários ensaios, é indiscutível um maior grau de modificação das partículas de silício nos ensaios em que foram conjugadas as duas tecnologias (ensaio 4, 5 e 6). Ainda assim, as micrografias dos ensaios 5 e 6 revelam partículas de silício com

um tamanho inferior e uma forma mais arredondada do que as do ensaio 4. Na literatura não foi encontrada qualquer justificação para este fenómeno. A ligeira diferença entre os ensaios 4 e 5 pode, eventualmente, ser justificada com o facto de ter havido pequenas alterações de procedimento que levaram a que o tempo entre o vazamento e a aplicação de pressão fosse mais curto nos ensaios 5 e 6 (cerca de 3 a 4 segundos de diferença) e, conseqüentemente, a que a percentagem de líquidos no momento inicial de aplicação da pressão fosse maior.

### **5.6.3. Análise dos compostos intermetálicos**

Foi efetuada uma análise qualitativa dos elementos intermetálicos em todos os ensaios. Tal como seria expectável, nos ensaios com tratamento acústico não são identificáveis as agulhas espessas e longas da fase  $\beta\text{-Al}_x\text{FeSi}$  e parece haver uma predominância das formas poliédricas sobre a escrita chinesa na fase  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{MnFe})_3\text{Si}_2$ . A literatura propõe várias explicações para a ausência/diminuição do tamanho das espessas e longas agulhas da fase  $\beta\text{-Al}_x\text{FeSi}$ . Por um lado, justifica-se essa ausência pelo aumento da atividade nucleante com o tratamento acústico, que origina o consumo do ferro a uma temperatura superior à temperatura de formação das agulhas. Outra justificação refere-se ao facto de o aumento da densidade dos grãos de  $\alpha\text{-Al}$  limitar o crescimento dos componentes intermetálicos, quer da fase  $\beta\text{-Al}_x\text{FeSi}$ , quer da fase  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{MnFe})_3\text{Si}_2$ . É igualmente sugerido que, devido à instabilidade termodinâmica causada pela atividade acústica no banho, a fase  $\beta\text{-Al}_x\text{FeSi}$  se transforma na forma de escrita chinesa. Outra possibilidade é a de que os fluxos acústicos homogeneizam o composto na matriz, dando assim origem às modificações de morfologia observadas [8], [44]. Com base na análise microestrutural realizada, é insipiente retirar conclusões sobre a fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ .

### **5.6.4. Análise da densidade/porosidades**

Segundo a literatura, uma das maiores vantagens da aplicação de pressão durante a solidificação é a possibilidade de eliminação das porosidades nos componentes obtidos [10]. Este aspeto, de extrema importância, foi verificado pela densidade das amostras de cada ensaio, calculada com base no peso e volume de cada amostra. É importante esclarecer que em todos os ensaios o procedimento de desgaseificação foi o mesmo. Os valores da densidade de cada ensaio são apresentados na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 – Densidade das amostras dos vários ensaios.**

	<b>Densidade</b> <i>(g/cm<sup>3</sup>)</i>
<i>Ensaio 1</i>	2,708
<i>Ensaio 2</i>	2,620
<i>Ensaio 3</i>	2,704
<i>Ensaio 4</i>	2,693
<i>Ensaio 5</i>	2,715
<i>Ensaio 6</i>	2,700

Os valores obtidos parecem estar de acordo com a literatura, verificando-se um ligeiro aumento da densidade nos ensaios nos quais foi aplicada pressão durante a solidificação. A aplicação de tratamento acústico isotérmico ou contínuo não parece afetar este parâmetro. De acordo com a literatura, os poros são completamente eliminados com pressões aplicadas na ordem de 50MPa, valor a partir do qual as amostras teriam a densidade teórica da liga utilizada, aproximadamente 2.74 [8, 18].

### **5.6.5.Durezas**

Na Tabela 5.9 estão representados os valores dos ensaios de dureza realizados.

**Tabela 5.9 – Valores obtidos nos ensaios de dureza.**

	<b>Média</b> <i>(HV)</i>	<b>Desvio- Padrão</b>	<b>Erro Associado</b>
<i>Ensaio 1</i>	87	4,39	0,55
<i>Ensaio 2</i>	88	2,99	0,37
<i>Ensaio 3</i>	86	4,34	0,54
<i>Ensaio 4</i>	93	4,17	0,52
<i>Ensaio 5</i>	80	4,65	0,58
<i>Ensaio 6</i>	74	3,90	0,49

Com base nos dados obtidos, é imprudente retirar qualquer conclusão definitiva. No entanto, é interessante verificar a diferença entre os ensaios 3 e 4. Ambos foram tratados acusticamente a 620-630°C mas foram aplicadas pressões diferentes durante a solidificação (5MPa no ensaio 3 e 10 MPa no ensaio 4). Assim, para o mesmo tipo de tratamento acústico, os dados parecem indicar um ligeiro aumento da dureza com o aumento da pressão, o que está de acordo com o relatado por Maleki *et al.* em [19]. Para retirar conclusões sobre a evolução da dureza com a conjugação destas duas tecnologias são necessários estudos adicionais.



## **CAPÍTULO 6.CONCLUSÃO**

O objetivo inicial deste trabalho era o desenvolvimento e construção de um equipamento para a averiguação do efeito combinado do tratamento acústico do metal líquido e da aplicação de pressão durante a solidificação. No entanto, devido à conjuntura nacional, problemas orçamentais impediram a concretização desse objetivo. Assim, o foco do autor desviou-se do projeto e construção do equipamento para uma alternativa que, não envolvendo a construção de um novo equipamento, permitisse estudar o efeito da conjugação das duas tecnologias. Com a colaboração do grupo SOLART e com a utilização de equipamentos do grupo e equipamentos do laboratório de fundição do DEM, foi possível a realização dos ensaios. As condições de realização dos ensaios não foram as ideais, mas permitiram a investigação do potencial da integração das duas tecnologias.

Deste modo, foi possível fazer um levantamento das alterações provocadas pela aplicação conjugada destas duas tecnologias. Foram analisadas por microscopia ótica as transformações ocorridas na matriz  $\alpha$ -Al, nas partículas de silício eutético e nos compostos intermetálicos, e realizados ensaios de dureza e determinação de volume e massa para cálculo da densidade das amostras.

Foram ensaiadas várias configurações com o intuito de testar o maior número combinações possível de parâmetros. Foram testados dois níveis de pressão, dois métodos de aplicação da energia acústica e, no caso do tratamento isotérmico, duas temperaturas de excitação.

Relativamente à microestrutura, as principais conclusões do estudo são:

- Separadamente, os dois processos causam diferentes efeitos na microestrutura, quer na matriz  $\alpha$ -Al, quer nas partículas de silício e intermetálicas. A aplicação isolada de pressão durante a solidificação provoca um aumento da incidência das estruturas dendríticas, apesar de as afinar. Isto deve-se sobretudo ao aumento do coeficiente de transferência de calor. A aplicação isolada do tratamento acústico provoca a formação de estruturas tendencialmente globulares, predominantemente equiaxiais e afinadas.
- O efeito da conjugação das duas tecnologias não é igual para todos os elementos da microestrutura da liga em estudo. Em relação à matriz  $\alpha$ -Al, os dados parecem indicar uma ligeira diminuição do tamanho médio de grão com o aumento da intensidade da pressão aplicada para tratamentos acústicos com parâmetros iguais. A circularidade média dos grãos parece ser negativamente afetada pela aplicação de pressão, independentemente da intensidade. Contudo, a principal alteração da morfologia à matriz  $\alpha$ -Al parece estar relacionada com a realização do processamento acústico, o qual parece ser responsável pela transformação das formações dendríticas em estruturas finas, globulares e equiaxiais.
- Em relação às partículas de silício foi efetuada uma análise meramente qualitativa. As micrografias recolhidas parecem indicar uma diminuição do tamanho das partículas de silício eutético e modificação da forma com a combinação das duas tecnologias. Relativamente às partículas intermetálicas, as alterações verificadas no processamento acústico (ausência das agulhas espessas e longas da fase  $\beta$ -Al<sub>x</sub>FeSi e predominância das formas poliédricas da fase  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>) parecem manter-se com a conjugação das duas tecnologias.

Relativamente à dureza e densidade, as principais conclusões do projeto são:

- Conforme já mencionado, uma das principais vantagens da aplicação de pressão durante a solidificação é a eliminação das porosidades. Este parâmetro foi avaliado com

base na densidade das amostras. Os dados parecem indicar um aumento da densidade nas amostras nas quais foi aplicada pressão durante a solidificação –  $2.62\text{g/cm}^3$  (95.6%) no ensaio efetuado sem aplicação de pressão durante a solidificação contra  $2.70\text{g/cm}^3$  (98.5%) de média dos ensaios realizados com aplicação de pressão durante a solidificação. São necessários testes adicionais para averiguação da evolução da densidade em valores mais elevados de pressão.

- Os dados dos ensaios de durezas são, na sua maioria, inconclusivos. No entanto, a progressão da dureza do ensaio 3 para o ensaio 4 é congruente com a literatura. São necessários ensaios adicionais para ajudar na definição da evolução deste parâmetro.

Em último lugar, é importante tecer alguns comentários sobre o procedimento experimental.

- Os ensaios foram realizados com o aparato que é apresentado na Figura 4.4. A prensa utilizada impôs alterações de alguns detalhes no procedimento. Primeiramente, as limitações de pressão (aproximadamente  $110\text{ kgf/cm}^2$ ), impostas pelo equipamento, não permitiram testes com os valores de pressão citados na literatura. Além disso, o espaço disponível na zona de trabalho da prensa não era suficiente para que o vazamento fosse realizado com a coquilha na posição onde seria aplicada a pressão. Este facto conduziu a atrasos na aplicação de pressão, dado que o vazamento era efetuado com o auxílio de uma placa que, depois do vazamento, era deslocada para a zona de trabalho. Todos estes passos, derivados das características intrínsecas do equipamento usado, deveriam ser reduzidos ou eliminados de modo a garantir um maior controlo dos parâmetros de funcionamento, em particular, a temperatura efetiva de início de aplicação da pressão.
- Foram obtidas amostras com características microestruturais muito benéficas e densidades interessantes com a aplicação de níveis de pressão baixos (relativamente aos valores da literatura), podendo ser indagado se não é possível reduzir as pressões de funcionamento dos equipamentos de *Squeeze Casting*, com todos os benefícios que isso acarreta – redução de gastos energéticos, aumento do tempo de vida dos componentes e tempos de ciclo mais curtos, por exemplo.

## 6.1.Sugestão de trabalhos futuros

O estudo realizado revelou ser possível a conjugação destas duas tecnologias com resultados muito promissores, mas é necessária mais investigação. Assim, propõem-se as seguintes sugestões:

- Que seja dada continuidade ao projeto, quer com a construção de um equipamento automatizado que permita o controlo dos parâmetros de funcionamento, quer através da colaboração com empresas que possuam equipamentos compatíveis;
- Realização de ensaios de resistência mecânica (tração e fadiga);
- Pesquisa de soluções para a realização de análises térmicas durante a aplicação de pressão;
- Investigação sobre os mecanismos de afinação de grão e modificação das partículas de silício e intermetálicas aquando da conjugação das duas tecnologias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

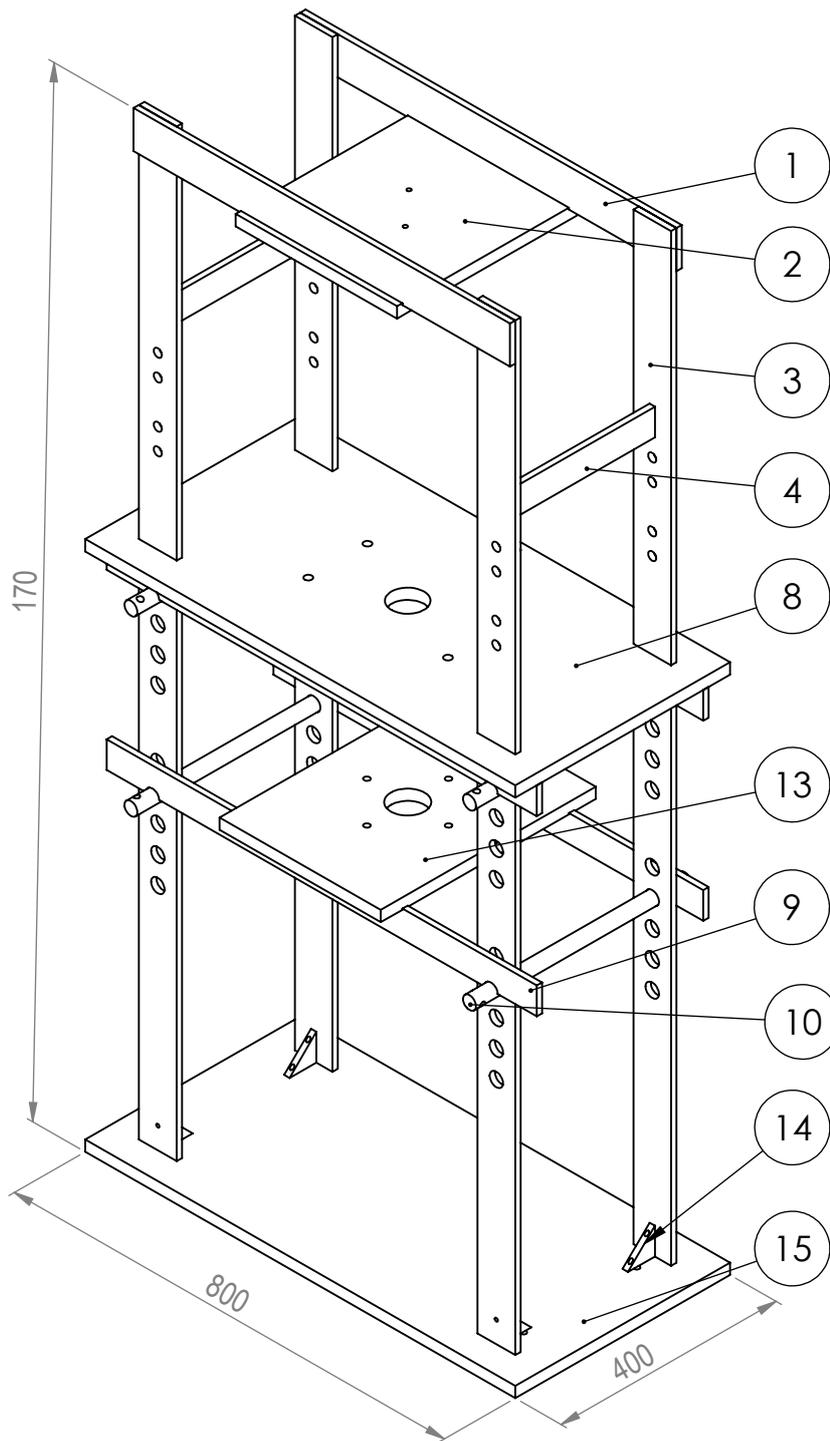
- [1] Z. Luo and A. Soria, “Prospective Study of the World Aluminium Industry”, IPTS, Seville, 2007.
- [2] B. W. D. Menzie, J. J. Barry, D. I. Bleiwas, E. L. Bray, T. G. Goonan, and G. Matos, “The Global Flow of Aluminum From 2006 Through 2025”, USGS, Reston, Virginia, 2010.
- [3] T. V. Atamanenko, “Cavitation-aided Grain Refinement in Aluminium Alloys”, PhD dissertation Technische Universiteit Delft, Delft, 2010.
- [4] J. R. Brown, *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. Oxford: Butterworth Heinemann, 1999.
- [5] P. Beeley, *Foundry Technology*, 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001.
- [6] W. F. Smith, *Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais*. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1998.
- [7] X. Jian, “The effect of ultrasonic vibration on the solidification of light alloys”, PhD dissertation, The University of Tennessee, Tennessee 2005.
- [8] H. Puga, “Desenvolvimento de uma Técnica de Fundição de Ligas de Alumínio de Alta Resistência”, Tese de Doutorado, Dep. Eng. Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, 2011.
- [9] T. M. Yue and G. a. Chadwick, “Squeeze casting of light alloys and their composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 58, no. 2–3, pp. 302–307, Mar. 1996.
- [10] M. Ghomashchi and A. Vikhrov, “Squeeze casting: an overview”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 101, pp. 1–9, 2000.
- [11] H. Kaufmann and P. J. Uggowitzer, *Metallurgy and Processing of High-Integrity Light Metal Pressure Castings*. Berlin: Schiele & Schön, 2007.
- [12] *ASM Handbook Castings*. Ohio: ASM International, 2008.
- [13] G. Hirt and R. Kopp, *Thixoforming, Semi-solid Metal Processing*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2009.
- [14] J. A. Costa and A. S. Melo, *Dicionário da Língua Portuguesa*, 7th ed. Porto: Porto Editora.
- [15] A. de Figueredo, *Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing*. Worcester, MA: Worcester Polytechnic Institute, 2001.

- [16] J. F. Wallace, "Optimization of the Squeeze Casting Process for Aluminum Alloy Parts Final Report", USDoE, Washington D.C., 2002.
- [17] K. Sukumaran, K. K. Ravikumar, S. G. K. Pillai, T. P. D. Rajan, M. Ravi, R. M. Pillai, and B. C. Pai, "Studies on squeeze casting of Al 2124 alloy and 2124-10% SiCp metal matrix composite", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 490, no. 1–2, pp. 235–241, Aug. 2008.
- [18] T. M. Yue, "Squeeze casting of high-strength aluminium wrought alloy AA7010", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 66, pp. 179–185, 1997.
- [19] A. Maleki, B. Niroumand, and A. Shafyei, "Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM13 alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 428, no. 1–2, pp. 135–140, Jul. 2006.
- [20] G. . Eskin, "Cavitation mechanism of ultrasonic melt degassing", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 2, no. 2, pp. S137–S141, Jan. 1995.
- [21] MPInterconsulting, "Basic Elements of MMM Systems & How MMM Systems Operate", 2005.
- [22] H. Puga, J. Barbosa, E. Seabra, S. Ribeiro, and M. Prokic, "The influence of processing parameters on the ultrasonic degassing of molten AlSi9Cu3 aluminium alloy", *Materials Letters*, vol. 63, no. 9–10, pp. 806–808, Apr. 2009.
- [23] H. Puga, J. Barbosa, J. Gabriel, E. Seabra, S. Ribeiro, and M. Prokic, "Evaluation of ultrasonic aluminium degassing by piezoelectric sensor", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 6, pp. 1026–1033, Jun. 2011.
- [24] D. Stefanescu, *Science and Engineering of Casting Solidification*, 2nd ed., Columbus, Ohio: Springer, 2008.
- [25] A. Rashid, (2010). "The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys". [Apresentação], [Online]. Available: [http://teacher.buet.ac.bd/bazlurrashid/mme6203/Lec\\_15.pdf](http://teacher.buet.ac.bd/bazlurrashid/mme6203/Lec_15.pdf). [Accessed: 14-Jan-2013].
- [26] M. Djurdjevic, H. Jiang, and J. Sokolowski, "On-line prediction of aluminum–silicon eutectic modification level using thermal analysis," *Materials characterization*, vol. 46, no. 1, pp. 31–38, Jan. 2001.
- [27] ANSI and PMI, *Project Management Body of Knowledge*. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2004.
- [28] F. Kreith, *Mechanical Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [29] K. M. Saridakis and a. J. Dentsoras, "Soft computing in engineering design – A review," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 22, no. 2, pp. 202–221, Apr. 2008.

- [30] L. F. da Silva, "Acetatos das aulas de Teoria de Projeto Mecânico." 2012.
- [31] Verein Deutscher Ingenieure, "Systematic Approach to the Design of technical systems and products," 2221, 1985.
- [32] D. Ullman, *The Mechanical Design Process*, 4th ed., New York: McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- [33] G. Dieter and L. Schmidt, *Engineering Design*, 4th ed., New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009.
- [34] Y. Haik and T. Shahin, *Engineering design process*, 2nd ed., CENGAGE Learning, 2010.
- [35] K. Rantanen and E. Domb, *Simplified TRIZ*, 2nd ed., Boca Raton: Auerbach Publications, 2008.
- [36] M. Kutz, *Mechanical Engineers' Handbook - Materials and Mechanical Design*, 3rd ed., vol. 1. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [37] F. B. Detanico, F. G. Teixeira, and T. K. Silva, "A Biomimética como Método Criativo para o Projeto de Produto," *Design & Tecnologia*, vol. 02, pp. 101–113, 2010.
- [38] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, "DIRECTIVA 2006/42/CE DO PARLAMENTO EUROPEU," *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 24–86, 2006.
- [39] "Catálogo online FRAMADA." [Online]. Available: <http://www.ramada.pt/>. [Accessed: 8-Dez-2012].
- [40] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. Dewolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 5th ed., New York: McGraw-Hill Higher Education, 2006.
- [41] J. Backerud, L., Chai, G., e Tamminen, *Solidification Characteristics of Aluminum Alloys*. Stockholm, Sweden: AFS/SKANALUMINIUM, 1990.
- [42] *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, E112-10, 2012.
- [43] M. Panuskova, E. Tillova, and M. Chalupova, "Relation between Mechanical Properties and Microstructure of Cast Aluminum Alloy AlSi9Cu3," *Strength of Materials*, vol. 40, pp. 98–101, 2008.
- [44] W. Khalifa, Y. Tsunekawa, and M. Okumiya, "Effect of ultrasonic treatment on the Fe-intermetallic phases in ADC12 die cast alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 15, pp. 2178–2187, Nov. 2010.



## **ANEXO I – DESENHOS TÉCNICOS**



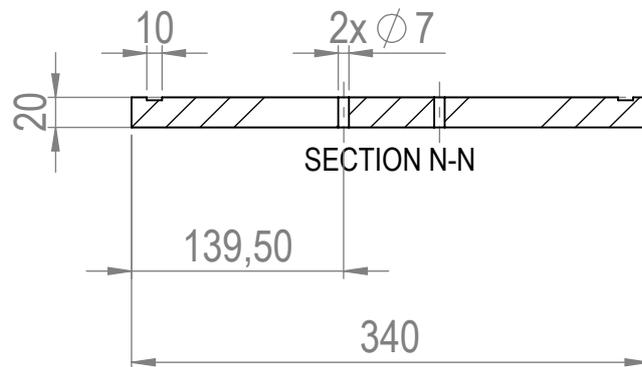
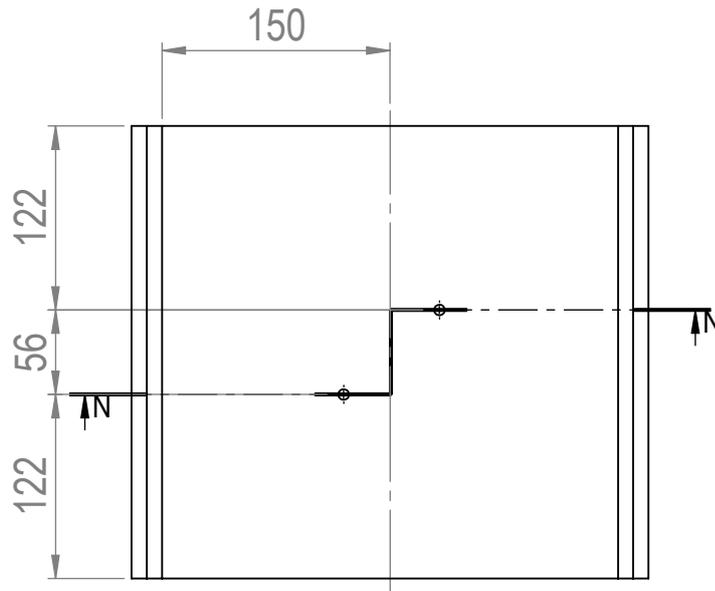
general angle 0,3...0,5

N8 Ra 3.2

Nº	Designação	Material
1	Barra suporte superior	CK45
2	Placa suporte do cilindro superior	CK45
3	viga	CK45
4	Barra auxiliar de suporte	CK45
8	Placa de Trabalho	CK45
9	Barra de suporte	CK45
10	Cavilha	CK45
13	Placa suporte do cilindro inferior	CK45
14	Nervura	CK45
15	Placa Chão	CK45

PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa		DATE 27.06.2012		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
drew J. Eduardo		DATE MODIFY				Desenho de conjunto			
MATERIAL:									
General tolerance SN 258440									
dimension nominale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000	Jacket Coaxe		
Ecart (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	SCALE: 10:1	SHEET 1 OF 1	A4

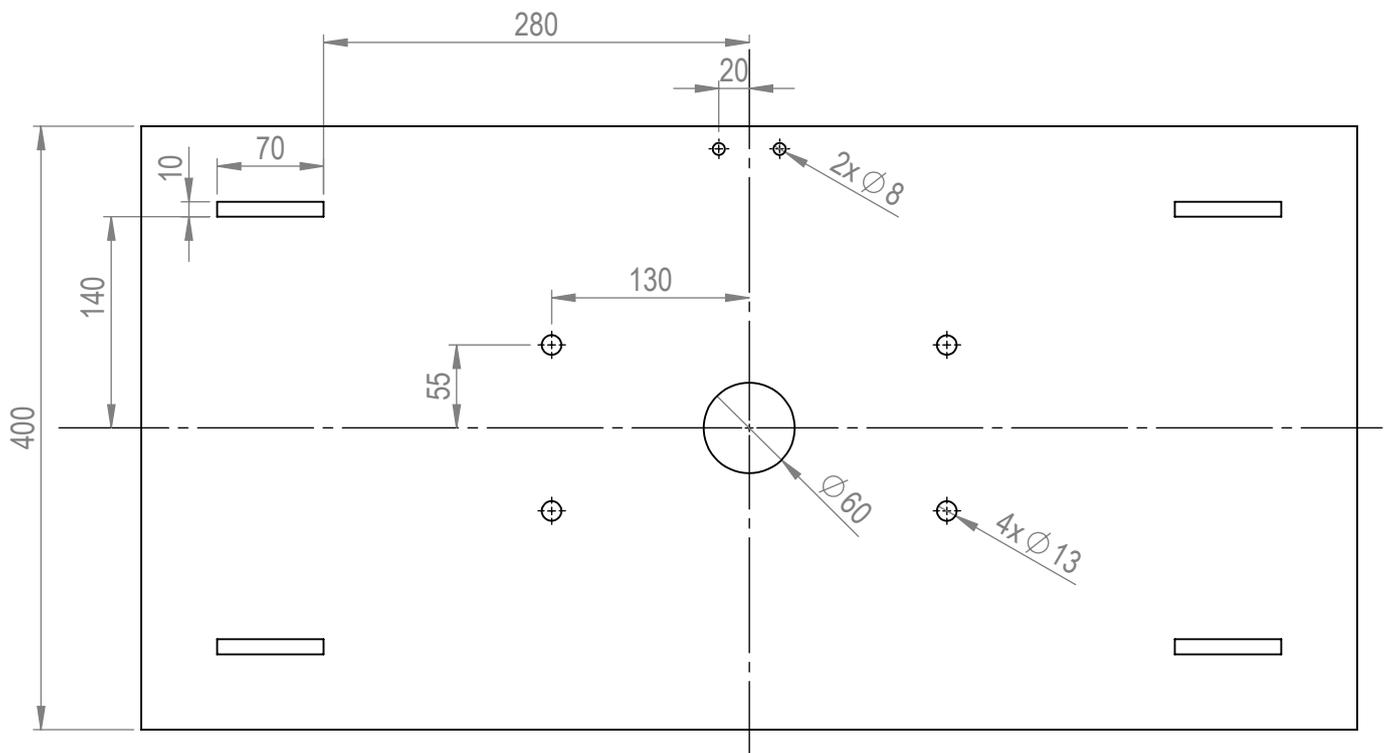




general angle 0,3...0,5

N8 Ra 3.2

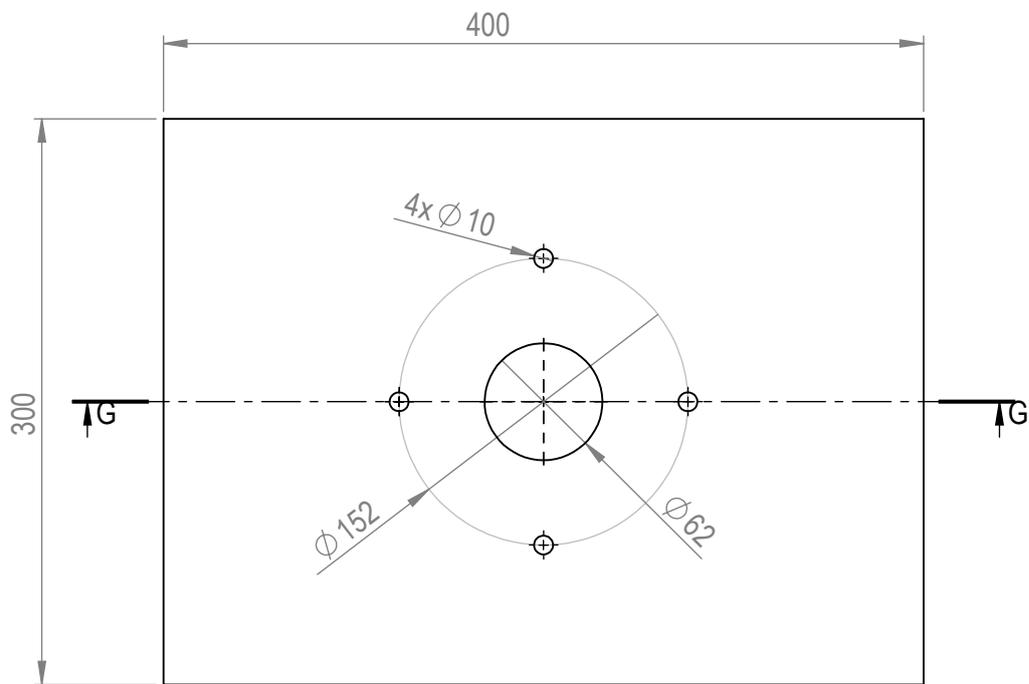
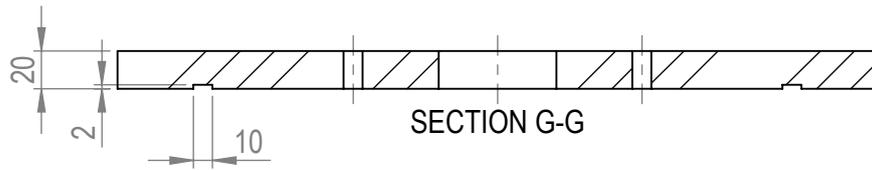
PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa	DATE 27.06.2012	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION					
drew J. Eduardo	DATE MODIFY		Placa suporte do cilindro hidraulico superior						
MATERIAL: Aço de construção CK45									
General tolerance SN 258440									
dimension nomiale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000			
Ecartis (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	SCALE: 10:1	SHEET 1 OF 1	A4



general angle 0,3...0,5

$\sqrt{N8}$  Ra 3.2

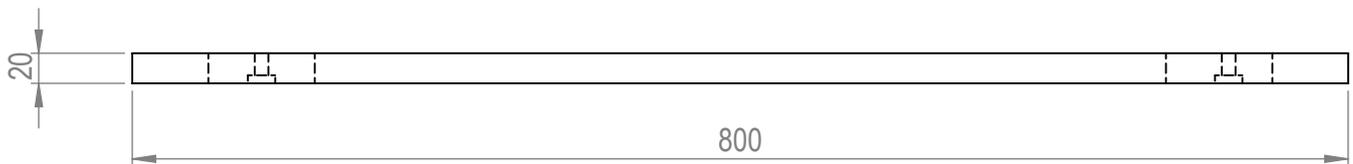
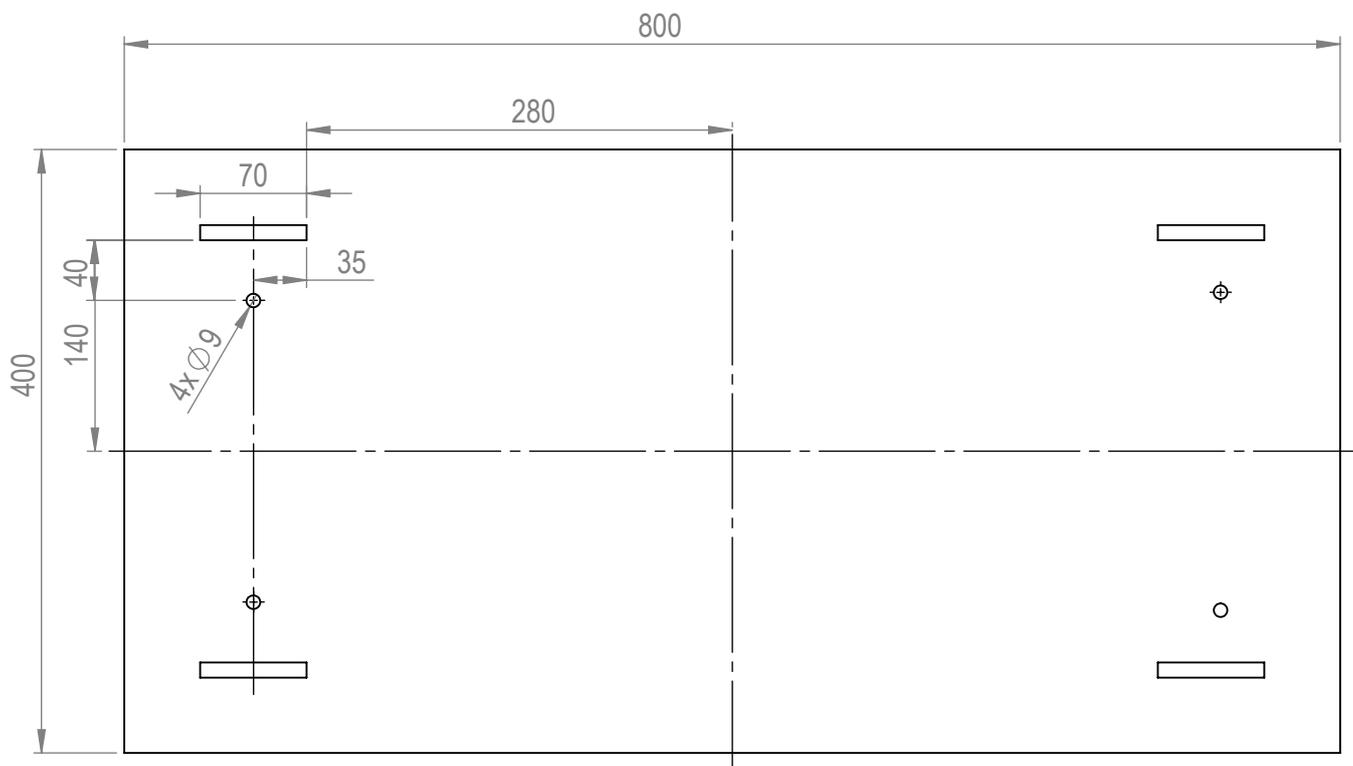
PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa	DATE 27.06.2012	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION					
drew J. Eduardo	DATE MODIFY		Placa de trabalho						
MATERIAL: Aço de construção CK45									
General tolerance SN 258440									
dimension nomiale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000	Componente 8		
Ecart (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	SCALE: 5:1	SHEET 1 OF 1	A4



general angle 0,3...0,5

$\sqrt{N8}$  Ra 3.2

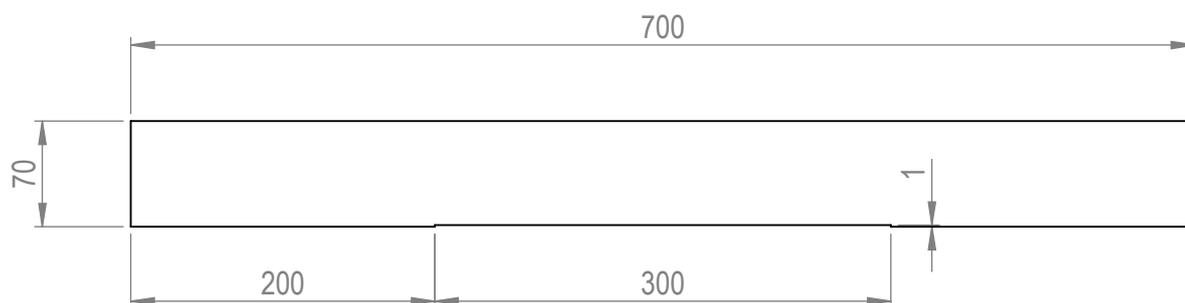
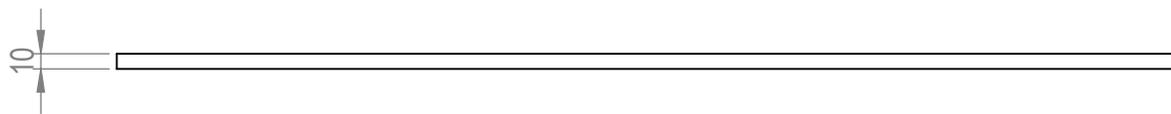
PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa	DATE 27.06.2012	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION					
drew J. Eduardo	DATE MODIFY		Placa suporte do cilindro inferior						
MATERIAL: Aço de construção CK45									
General tolerance SN 258440									
dimension nomiale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000	Componente 13		
Ecartis (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	SCALE: 4:1	SHEET 1 OF 1	A4



general angle 0,3...0,5

N8/Ra 3.2

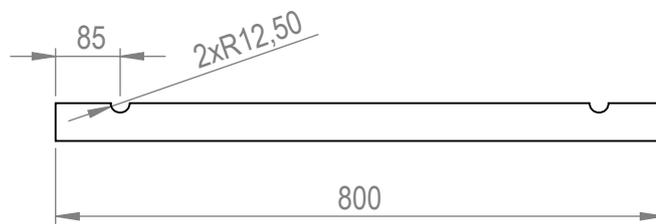
PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa	DATE 27.06.2012	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION					
drew J. Eduardo	DATE MODIFY		Placa de chão						
MATERIAL: Aço de construção CK45									
General tolerance SN 258440									
dimension nomiale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000	Componente 15		
Ecartis (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	SCALE: 5:1	SHEET 1 OF 1	A4



general angle 0,3...0,5

N8/Ra 3.2

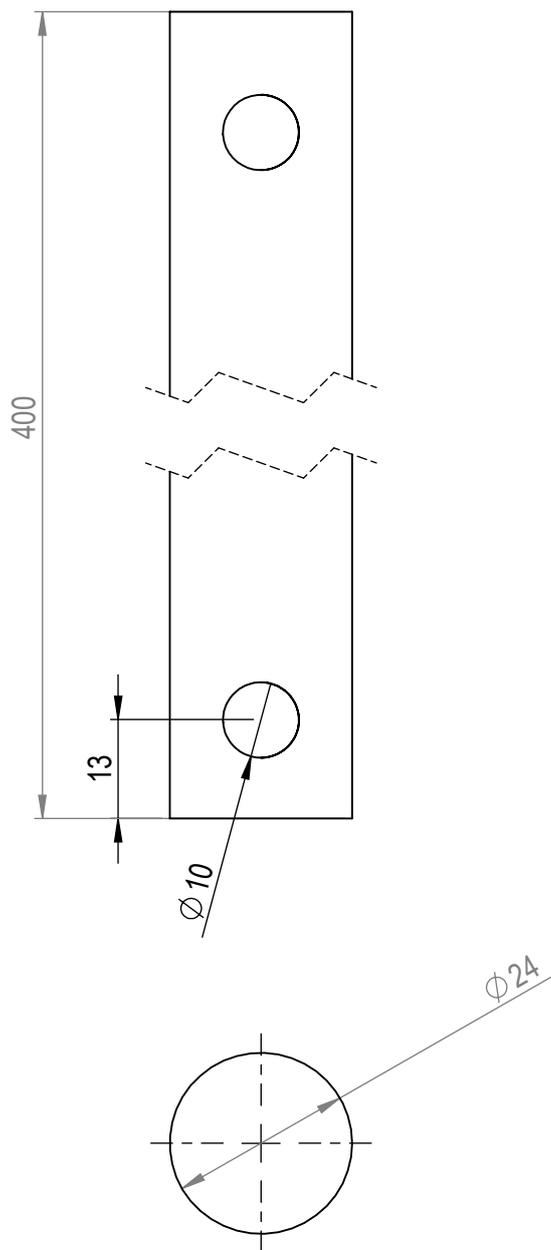
PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa	DATE 27.06.2012	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION					
drew J. Eduardo	DATE MODIFY		Suporte da Placa superior						
MATERIAL: Aço de construção CK45									
General tolerance SN 258440									
dimension nomiale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000	Componente 1		
Ecart (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	SCALE: 5:1	SHEET 1 OF 1	A4



general angle 0,3...0,5

$\sqrt{N8}$  Ra 3.2

PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa	DATE 27.06.2012	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION					
drew J. Eduardo	DATE MODIFY		Barra suporte						
MATERIAL: Aço de construção CK45									
General tolerance SN 258440									
dimension nominale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000	Componente 9		
Ecart (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	SCALE: 10:1	SHEET 1 OF 1	A4



general angle 0,3...0,5

N8 Ra 3.2

PROJECT DIRECTOR H.Puga / J. Barbosa	DATE 27.06.2012	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION		
drew J. Eduardo	DATE MODIFY		Cavilha			
MATERIAL: Aço de construção CK45						
General tolerance SN 258440						
dimension nominale (mm)	>3 ...6	>6 ...30	>30 ...120	>120 ...400	>400 ...1000	>1000 ...2000
Ecart (mm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5
SCALE: 2:1				SHEET 1 OF 1	A4	