

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Armindo Fernando da Silva Pereira

**Utilização de ultra-sons para
afinamento da microestrutura de
ligas de alumínio vazadas em areia**

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrado Conducente ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Joaquim Barbosa

DECLARAÇÃO

Armindo Fernando da Silva Pereira

Correio electrónico: a38033@alunos.uminho.pt

Telefone: 968171232

Número do Bilhete de Identidade: 11905014

Título dissertação:

Utilização de ultra-sons para afinamento da microestrutura de ligas de alumínio vazadas em areia

Ano de conclusão: 2011

Orientador:

Professor Doutor Joaquim Barbosa

Designação do Mestrado:

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

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

A concretização deste trabalho não seria possível sem a contribuição de algumas pessoas que me acompanharam e incentivaram ao longo deste tempo. Por isso queria aqui deixar algumas palavras de apreço e os meus sinceros agradecimentos:

Ao Professor Doutor Joaquim Barbosa, pela sua orientação.

Ao Engenheiro Hélder Puga pela disponibilidade e apoio necessários para ultrapassar alguns dos obstáculos que foram surgindo ao longo do trabalho.

À Tânia pelo apoio, preocupação e encorajamento. A todos os meus amigos pela amizade e apoio demonstrado.

À minha família, nomeadamente aos meus pais e minha irmã Gabriela, por desde sempre me terem apoiado e incentivado a aqui chegar.

RESUMO

O presente trabalho destina-se à obtenção do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Este trabalho levado a cabo no laboratório de fundição do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, tem como objectivo o estudo da tecnologia de vibração por ultra-sons, e a avaliação da sua influência na morfologia microestrutural para a liga A356.

O processo de fundição é uma técnica de fabrico de grande importância porque permite a produção de peças com grande variedade de formas e tamanho.

A utilização de ultra-sons na fundição é um método inovador e em constante desenvolvimento. A utilização de energia acústica permite, obter na fundição estruturas globulares nas ligas de Al-Si, promovendo uma melhoria nas propriedades mecânicas da peça vazada, devido ao seu mecanismo de afinação de grão por cavitação acústica e fragmentação dendrítica.

Neste trabalho foi analisada a afinação de grão através do tratamento por ultra-som através da aplicação de energia acústica por imersão do radiador de ultra-sons no metal líquido na moldação em areia verde, tendo sido feitos três ensaios, com moldes de diâmetro igual a 30 mm, 45 mm e 60 mm e com comprimento de 130 mm. Também foram feitos três ensaios para os mesmos diâmetros e comprimento, mas que não foram sujeitas ao uso de ultra-sons. Foi também feita a análise térmica em três pontos do fundido, início, meio e fim.

Os resultados evidenciam que o processamento por vibração acústica promove a afinação de grão, pois, garante a redução do tamanho médio de grão e também promove a fragmentação dendrítica.

Palavras - chave: Ultra-sons, cavitação acústica, liga de alumínio, afinação de grão, análise térmica

ABSTRACT

This work is intended to obtain the master degree in Mechanical Engineering from the Minho University. This work carried out in the foundry laboratory, on the Department of Mechanical Engineering, Minho University, aims to study the technology of ultrasonic vibration, and the evolution of their influence on the microstructural morphology for the alloy A356.

The foundry process is a technique of production of great importance allowing the production of parts with great variety of forms and sizes.

The use of ultrasounds in foundry is an innovative method and in constant development and in foundry, the use of acoustic cavitation allows obtaining globular structures in Al-Si alloys, promoting an improvement of the mechanical properties of casting, due to the mechanism of grain refinement by cavitation and dendritical fragmentation.

In this work the grain refinement was analyzed through ultrasound treatment on as follows: application of acoustic energy by immersing the radiator in an ultrasonic liquid metal on a casting of green sand, having been made three castings, with casts of 30 mm, 45 mm, 60 mm of diameter and 130 mm of length. It was also made three castings for the same diameter and length, but ultrasounds weren't used. Also, it was made a thermal analysis on three points, in the beginning, middle and on the end of the cast.

The results show that the processing of acoustic vibration promotes the refinement of grain, therefore, guarantees the reduction of grain size and the dendritical fragmentation.

Keywords: Ultrasound; acoustical cavitation; aluminum alloy; grain refinement; thermal analysis

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	
1.1.	Estruturação da tese e objectivos do trabalho	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	Ligas de Al-Si	3
2.2.	Tratamentos de banhos da liga de Al-Si	4
2.2.1.	Desgaseificação tradicional e por ultra-sons.....	5
2.2.2.	Nucleação.....	8
2.2.3.	Dendrites	10
2.2.4.	Modificação do Silício	11
2.3.	Afinação de grão e modificação do silício por adição química	12
2.3.1.	Tipos de afinadores de grão	12
2.3.2.	Tipos de modificadores de silício eutético	13
2.4.	Afinação de grão e modificação do silício por ultra-sons	14
2.4.1.	Fragmentação dendrítica	15
2.4.2.	Cavitação acústica.....	15
3.	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	17
3.1.	Materiais	17
3.1.1.	Liga	17
3.1.2.	Moldação.....	17
3.2.	Equipamentos.....	18
3.2.1.	Unidade de fusão.....	18
3.2.2.	Ultra-sons	19
3.2.3.	Termopares	20
3.2.4.	Alimentadores	21
3.2.5.	Sistema de enchimento.....	21

3.3.	Metodologia experimental	22
3.3.1.	Elaboração da moldação	22
3.3.2.	Dimensionamento e construção dos vários componentes da moldação.....	25
3.3.3.	Fusão e desgaseificação	33
3.3.4.	Ensaio sem ultra-sons	34
3.3.5.	Ensaio com ultra-sons.....	34
3.4.	Técnicas de caracterização térmica e microestrutural.....	35
3.4.1.	Caracterização térmica.....	35
3.4.2.	Caracterização microestrutural	35
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1.	Análise Térmica.....	37
4.1.1.	Sem vibração acústica.....	37
4.1.2.	Com vibração acústica	39
4.2.	Microestrutura.....	41
4.2.1.	Sem vibração acústica.....	41
4.2.2.	Com vibração acústica	45
4.2.3.	Efeito da potência eléctrica do ultra-som nas características morfológicas da microestrutura	49
5.	CONCLUSÕES	51
5.1.	Propostas para trabalhos futuros	52
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de fases alumínio-silício e microestrutura dos componentes puros e liga das várias composições[6].	4
Figura 2 Solubilidade do Hidrogenio durante solidificação.	5
Figura 3 Redução do teor de H dissolvido no banho com o tempo de degaseificação.....	7
Figura 4 Comparação entre as energias envolvidas na nucleação homogénea e heterogénea.	9
Figura 5 Superfície a ser criada pela nucleação a partir de um substrato.	10
Figura 6 Dendrite originada na solidificação.	11
Figura 7 Forno de resistências e cadinho de carboneto de silício.	18
Figura 8 (1) Gerador de Ondas; (2) Conversor acústico; (3) Waveguide; (4) Radiador acústico.....	19
Figura 9 Equipamento utilizado CompactDAQ e termopares.	20
Figura 10 Esquema do sistema de enchimento e o alimentador.	22
Figura 11 Meio molde inferior, canal de distribuição e ataque na meia caixa de moldação.	23
Figura 12 Imagem do sistema de enchimento e o alimentador.	24
Figura 13 Esquema final antes do vazamento.....	24
Figura 14 Imagem dos 3 moldes com diâmetros de 30,45 e 60 mm e com um comprimento de 130mm.	25
Figura 15 Dimensão do alimentador para 30mm.Terá 71mm de comprimento e 47mm de diâmetro. 26	
Figura 16 Dimensão do alimentador para 45mm.Terá 99mm de comprimento e 66mm de diâmetro. 26	
Figura 17 Dimensão do alimentador para 60mm.Terá 125mm de comprimento e 83mm diâmetro. ...	27
Figura 18 Imagem final dos alimentadores.....	27
Figura 19 Canal de descida, canal de distribuição e dois canais de ataque.....	33
Figura 20 Vazamento sem recurso a ultra-sons.	34
Figura 21 Vazamento da liga com recurso ao uso dos ultra-sons.	35
Figura 22 Esquema de representação da localização das amostras.....	36
Figura 23 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 30 mm sem vibração acústica.	38
Figura 24 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 45 mm sem vibração acústica.	38
Figura 25 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 60 mm sem vibração acústica.	39
Figura 26 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 30 mm com vibração acústica.....	40
Figura 27 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 45 mm com vibração acústica.	40

Figura 28 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 60 mm com vibração acústica.....	41
Figura 29 Microestruturas de diâmetro de 30 mm, da Liga A356 sem qualquer tipo de afinação de grão com amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).....	42
Figura 30 Microestruturas de diâmetro de 45 mm, da Liga A356 sem qualquer tipo de afinação de grão com amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).....	43
Figura 31 Microestruturas de diâmetro de 60 mm, da Liga A356 sem qualquer tipo de afinação de grão com amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).....	44
Figura 32 Microestruturas de diâmetro de 30 mm, da Liga A356 com vibração acústica de 250 W e amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).....	45
Figura 33 Microestruturas de diâmetro de 45 mm, da Liga A356 com vibração acústica de 250 W e amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).....	46
Figura 34 Microestruturas de diâmetro de 60 mm, da Liga A356 com vibração acústica de 250 W e amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).....	47
Figura 35 Relação do tamanho de grão com uso de ultra-sons e sem ultra-sons para diâmetro de 30 mm.	49
Figura 36 Relação do tamanho de grão com uso de ultra-sons e sem ultra-sons para diâmetro de 45 mm.	50
Figura 37 Relação do tamanho de grão com uso de ultra-sons e sem ultra-sons para diâmetro de 60 mm.	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Composição (% em peso) das ligas de alumínio para fundição.....	17
Tabela 2 Tabela-resumo das características morfológicas das microestruturas apresentadas anteriormente.	48

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Alimentador	Massa de metal vazado ao mesmo tempo que a peça, com a função de fornecer metal líquido ao fundido durante a solidificação, para eliminar os defeitos provocados pela contracção volumétrica do metal, durante o arrefecimento.
Areia	Material granular, resultante da desintegração natural ou artificial de rochas ou depósitos minerais. Apresenta-se em partículas com diâmetros normalmente compreendidos entre 0,06 e 2 mm.
Cadinho	Recipiente cerâmico em forma de pote, normalmente com características refractárias, resistente a altas temperaturas, onde se fundem materiais a altas temperaturas.
Cavitação	Formação, crescimento e colapso de bolhas dentro de um líquido.
Desgaseificação	Processo físico de libertação de gás contido no metal líquido.
Escória	Conjunto de impurezas removidas do metal líquido antes de começar o vazamento.
Expansão	Aumento de volume.
Fundido	Componente executado em metal liquefeito e vazado numa moldação.
Impurezas	Substância dentro de uma quantidade confinada de líquido, gás, ou sólido, que difere da composição química do material composto.

Microestrutura	Características físicas do metal que foi fundido e que pode ser observado ao microscópio óptico.
Moldação	Conjunto de elementos, fabricado num material refractário ou numa liga metálica, que, entre outros, contém a cavidade destinada a receber o metal líquido, que após solidificação dá origem a uma peça com a configuração que se pretende.
Rechupe	Vazio aberto ou fechado, resultante da contracção não compensada no estado líquido e durante a solidificação.
Ultra-som	É um som a uma frequência superior ao limite audível, aproximadamente 20kHz.
Vazamento	Transferência de metal líquido do cadinho para a cavidade da moldação.

1. INTRODUÇÃO

A fundição está actualmente na base de quase toda a actividade industrial. Peças geometricamente complexas e de qualquer dimensão podem actualmente ser produzidas por fundição, em qualquer tipo de liga e qualquer que seja a sua futura aplicação. Sectores industriais tão diferentes como a indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial, incorporam grandes quantidades de peças fundidas, o que revela bem o desempenho e vasto domínio de aplicação dos fundidos, e a importância da fundição no mundo actual.

Na fundição o tratamento por ultra-sons tem sido objecto de estudo no que diz respeito à fragmentação dendrítica, afinação de grão e desgaseificação, mas tem tido à escala industrial, pouco impacto tecnológico [1]. O uso de ultra-sons, no alumínio e suas ligas, apresenta ser uma técnica ambientalmente limpa [2].

Nas ligas de Al-Si, o uso de energia acústica como mecanismo de obtenção de estruturas globulares, sem dendrites, é um tema que ainda carece de uma maior investigação, uma vez que os seus modelos teóricos existentes requerem uma maior validação experimental. O respectivo processo ocorre através do fornecimento de vibração acústica ao banho metálico, o que provoca fenómenos de expansão e compressão no líquido. As oscilações dão origem a cavidades que começam a pulsar, diminuindo e aumentando de volume, acabando por colapsar após alguns ciclos. O fenómeno de formação, crescimento e colapso de bolhas é designado por cavitação. Após a expansão e colapso das bolhas, a temperatura diminui nas cavidades, formando-se embriões que, são uniformemente distribuídos por todo o metal líquido, por acção da agitação do banho pelo ultra-som, dando origem a um grande número de núcleos de solidificação que promovem a formação de estruturas globulares. Esta técnica provoca fragmentação dendrítica [1]. A sua importância faz-se assim sentir na microestrutura final, podendo-se atingir dimensões mais reduzidas de tamanho de grão, o que proporcionam uma melhoria das propriedades mecânicas.

No âmbito deste trabalho o estudo efectuou-se de acordo com o seguinte processo:

1. A liga A356 foi fundida num cadinho e vazada na moldação para ser submetida a um tratamento por ultra-sons, com imersão do radiador acústico no banho, a uma temperatura de 700°C.
2. Seguidamente a liga foi também fundida num cadinho e vazada na moldação, mas desta vez sem tratamento por ultra-sons.
3. Por fim a peça fundida foi utilizada para obtenção de provetes para realização da análise morfológica da microestrutura, com recurso à microscopia óptica.

1.1. Estruturação da tese e objectivos do trabalho

O principal objectivo deste trabalho consistiu no estudo da tecnologia de vibração por ultra-sons, e a avaliação da sua influência na morfologia microestrutural para a liga A356.

Esta dissertação está organizada e dividida em 6 capítulos:

Capítulo 1, “Introdução”, apresenta-se uma breve descrição ao tema do trabalho e estruturação da tese.

Capítulo 2, “Revisão Bibliográfica”, apresenta-se um conjunto de referências teóricas encontradas na bibliografia actual, sobre liga de Al-Si, afinação e modificação por adição química e por ultra-sons.

Capítulo 3, “Materiais, Equipamentos e Metodologia Experimental”, apresenta-se os procedimentos experimentais realizados e, ainda, a descrição de todos os ensaios realizados.

Capítulo 4, “Resultados e Discussão”, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

Capítulo 5, “Conclusões”, apresenta-se as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6, “Referências Bibliográficas”.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ligas de Al-Si

As ligas Al-Si são as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio, principalmente pela sua alta fluidez, baixa contracção nos fundidos, elevada resistência à corrosão e baixo coeficiente de expansão térmica [3]. Para além do mais, a presença do teor em silício promove uma melhoria nas propriedades mecânicas, nomeadamente, tensões de cedência, tensões de rotura e ductilidade.

As ligas de alumínio com 5-20% de Si (percentagem em peso) são as mais comuns e igualmente as mais usadas na indústria. A característica marcante destas ligas é que elas consistem numa fase primária, de alumínio ou de silício, e de uma estrutura eutética composta por esses 2 elementos. Dependendo da quantidade de Si, as ligas podem dividir-se em:

- a) Ligas hipereutéticas, as mais comuns, encontram-se na faixa de 13-20% de Si;
- b) Liga eutética com 12,6% de Si em peso;
- c) Ligas hipoeutéticas com teor de Si menor que da liga eutética.

O efeito do silício nas ligas de alumínio é melhorar a vazabilidade. A adição de silício no alumínio puro pode melhorar drasticamente a fluidez, reduzindo a formação de rechupes e facilitando a alimentação. Na Figura 1 pode-se ver o diagrama de fases da liga Al-Si.

Entre as ligas comerciais Al-Si, destaca-se a liga A356, sendo utilizada em muitas aplicações tais como na engenharia eléctrica, marinha, automóvel e aeroespacial [4]. Uma das suas características mais importantes é o facto de ela apresentar baixas quantidades de impurezas e de fases intermetálicas, além da sua boa fluidez no estado líquido, elevada relação resistência/peso e baixo custo [5].

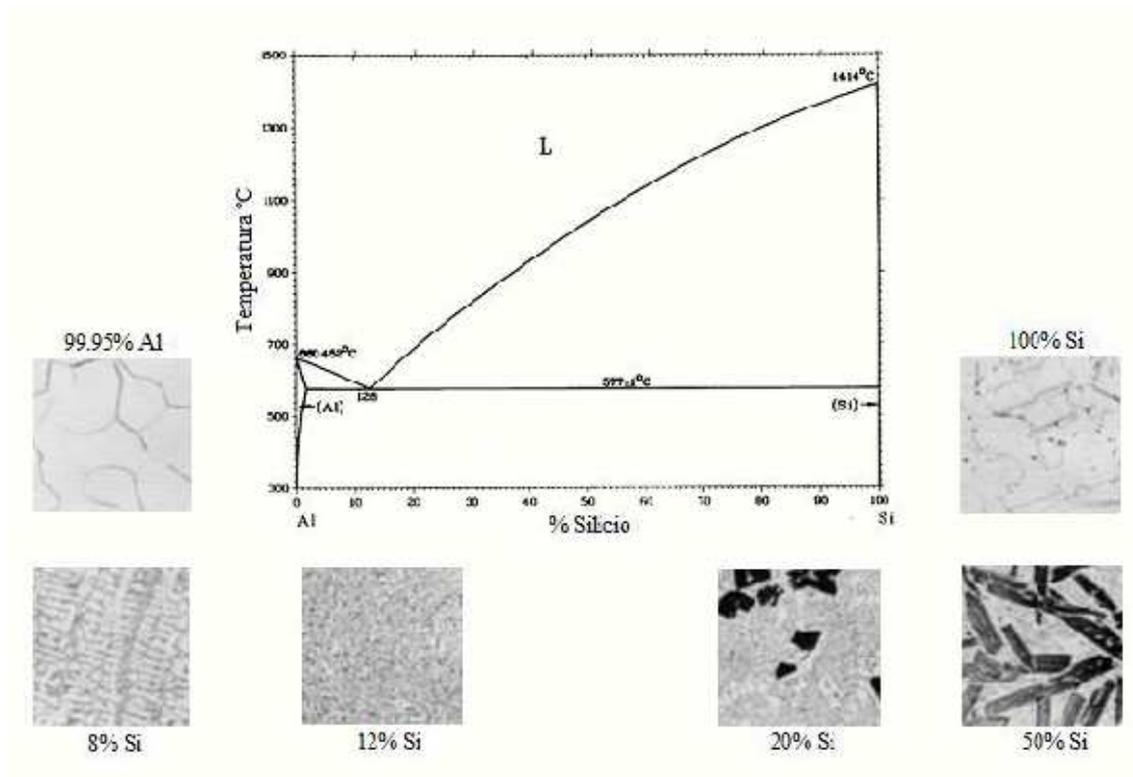


Figura 1 Diagrama de fases alumínio-silício e microestrutura dos componentes puros e liga das várias composições[6].

2.2. Tratamentos de banhos da liga de Al-Si

As propriedades das ligas de Al-Si dependem do processo de moldação que foi utilizado, visto que este condiciona a velocidade de arrefecimento dos fundidos e, por isso, é responsável pela microestrutura em bruto de vazamento. A adição de alguns elementos de liga, tais como o cobre e o magnésio, possibilitam a execução de tratamentos térmicos que melhoram as propriedades mecânicas das ligas base.

Mas, a fundição de ligas de alumínio não é tarefa fácil, uma vez que são sujeitas à obtenção de estruturas grosseiras e heterogêneas (geralmente dendríticas), bem como à absorção de hidrogênio durante a operação de fusão, o que obriga a um conjunto de

procedimentos que se designam por “tratamento do metal líquido”, destinados a refinar a estrutura, reduzir o teor de hidrogénio dissolvido (degaseificação) e modificar a morfologia do silício eutético. Modificação do silício eutético e afinação do grão são, operações fundamentais para o desempenho do produto final [7].

2.2.1. Degaseificação tradicional e por ultra-sons

Degaseificação pode-se definir como um processo físico da lenta libertação de gases quando presos. De uma maneira geral, os metais no estado líquido têm tendência a absorver gases da atmosfera. As ligas de alumínio apresentam uma grande solubilidade de hidrogénio no estado líquido (acima de 660°C). Entretanto, na solidificação, a solubilidade de H diminui drasticamente, conforme mostra a Figura 2.

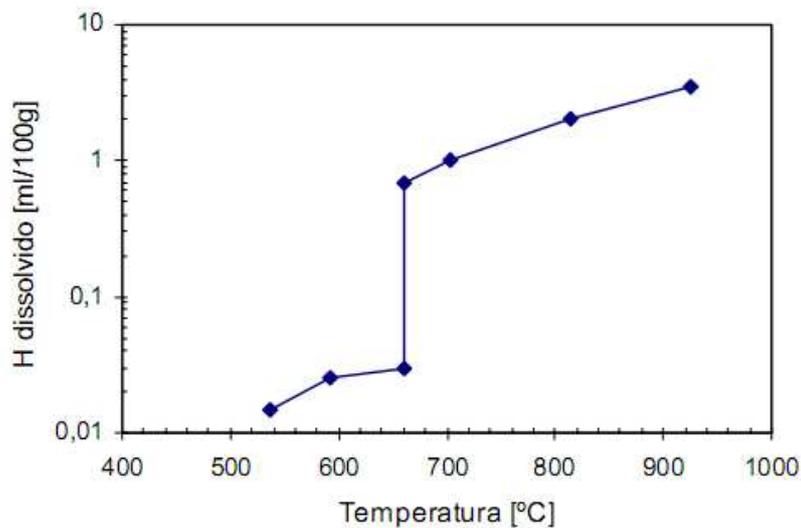


Figura 2 Solubilidade do Hidrogenio durante solidificação.

Em decorrência deste facto, durante a solidificação, cerca de 95% do hidrogénio é segregado para as últimas porções de líquido, atingindo teores elevados e promovendo a formação de porosidades em regiões interdendríticas. Tais porosidades têm um efeito

prejudicial sobre as propriedades mecânicas, nomeadamente sobre a ductilidade e a resistência à fadiga. A absorção de hidrogénio pelo metal líquido ocorre através da redução do vapor de água.

A eliminação das porosidades decorrentes da absorção de H pode ser obtida de três formas:

- reduzir a absorção de hidrogénio durante as etapas de fusão, manutenção e vazamento;
- dificultar a nucleação das porosidades;
- promover a desgaseificação da liga antes do vazamento;

O processo de desgaseificação é o mais utilizado e é tradicionalmente realizado por três processos:

- 1- desgaseificação por vácuo;
- 2- utilização de um gás activo, normalmente cloro, adicionado por meio de pastilhas de hexacloretano ou por um tubo perfurado (cloro gasoso);
- 3- utilização de um gás neutro (Ar ou N₂) através de tubo perfurado;

Os dois primeiros processos apresentam uma alta eficiência na remoção do H dissolvido. Entretanto, apresentam como desvantagem, respectivamente, o custo do equipamento e a toxicidade associada à corrosividade do gás cloro.

A utilização de um gás neutro apresenta como vantagem o baixo custo, mas exige um tempo de tratamento superior, conforme ilustra a Figura 3.

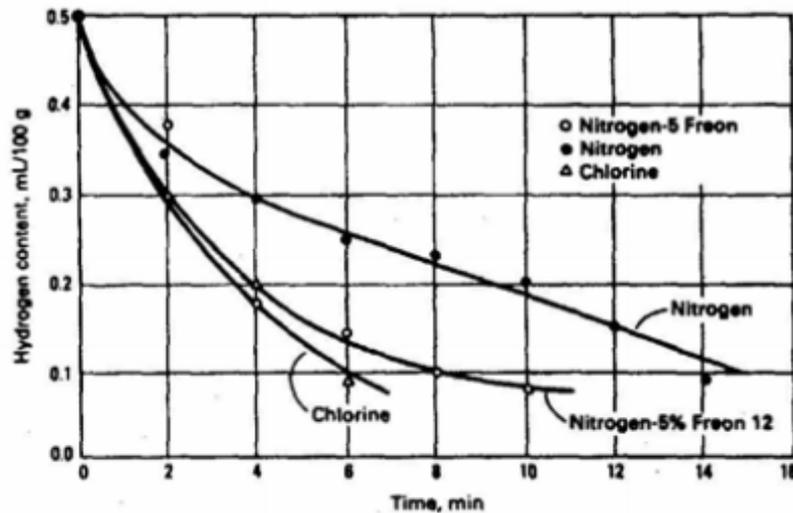


Figura 3 Redução do teor de H dissolvido no banho com o tempo de desgaseificação.

Com uso de ultra-sons, a cavitação acústica facilita o crescimento de bolhas gasosas. O processo de desgaseificação do banho depende da intensidade do tratamento por ultra-sons, isto é, da quantidade de gás, da magnitude da pressão sonora e de outros parâmetros do metal líquido [8]. Como grandes intensidades de vibração produzem baixas pressões, então, a eficiência de desgaseificação é proporcional à intensidade de vibração [1].

A eficiência da desgaseificação depende da potência eléctrica que, é convertida em energia acústica, mas, não é afectada pela frequência de ressonância e também a desgaseificação diminui com o abaixamento da temperatura. Para Eskin [9], o desenvolvimento da cavitação acústica aumenta a eficácia da desgaseificação em cerca de 30-60%, dando ao metal melhores propriedades mecânicas.

Devido ao decréscimo da vibração por ultra-sons no líquido, a cavitação forma-se sobretudo perto do radiador de ultra-sons e as bolhas são transportadas através do metal líquido, por radiação sonora. Desde que as bolhas de cavitação sejam pequenas, e a área de interface bolhas/metal líquido, grande, a desgaseificação torna-se bastante rápida, se a maior parte das bolhas de cavitação se escaparem do líquido. Devido ao fluxo produzido pelas ondas acústicas, as bolhas de cavitação formadas perto do radiador são transportadas rapidamente até à superfície do banho [10][11].

2.2.2. Nucleação

Pode-se definir nucleação como o aparecimento da fase sólida de forma estável no seio da fase líquida, sob a forma de pequenos núcleos cristalinos.

É um fenómeno que pode ocorrer com a formação de núcleos directamente a partir do líquido (nucleação homogénea) ou com a formação de núcleos sobre superfícies pré-existentes (nucleação heterogénea).

2.2.2.1. *Nucleação homogénea*

A nucleação homogénea ocorre aleatoriamente em todo o sistema, ou seja, não existem sítios preferenciais para a formação de núcleo. Uma condição necessária para este tipo de nucleação é que a matriz seja química, estrutural e energeticamente homogénea. Do ponto de vista experimental questiona-se a ocorrência ou não da nucleação homogénea visto que cada fase real contém algum tipo de defeito, como inclusões sólidas, impurezas, superfícies estranhas, etc.

Num metal líquido, a nucleação homogénea ocorre quando o próprio metal fornece os átomos para formar os núcleos. Quando um metal líquido puro é arrefecido abaixo da temperatura de fusão, T_f , criam-se numerosos núcleos homogéneos através do lento movimento dos átomos que se vão ligando uns aos outros. Para que um núcleo seja estável, de modo a crescer e formar um cristal, o mesmo deve atingir um raio crítico, r^* . Assim um “cluster” de átomos ligados uns aos outros formam um embrião, se o embrião atingir um tamanho superior que r^* , eles crescem e levam à cristalização total. Este processo é chamado de nucleação e a taxa na qual os embriões da fase estável aparecem é denominada taxa de nucleação.

2.2.2.2. Nucleação heterogénea

A nucleação heterogénea ocorre no líquido quando há sítios preferenciais como contornos de grão, inclusões, bolhas, sobre as paredes do recipiente, impurezas insolúveis ou outro material presente na estrutura, estas superfícies já existentes diminuem a energia interfacial, γ , ou energia de superfície, e portanto há uma diminuição da barreira termodinâmica necessária para formar um núcleo estável.

Nas operações industriais de vazamento, a nucleação é heterogénea e não homogénea. A Figura 4 ilustra que a superfície a ser criada pela nucleação a partir de um substrato (nucleação heterogénea) é menor, (comparada a da nucleação homogénea) podendo facilitar o processo, pois exige menor energia de interface (barreira energética). Observa-se também que o núcleo resultante da presença de um substrato (N1) possui menor volume e, portanto, menor número de átomos.

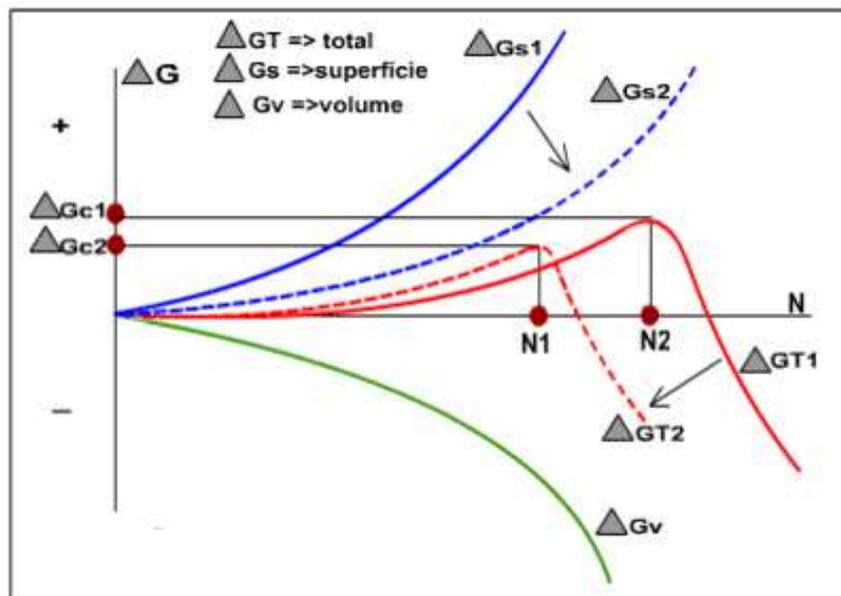


Figura 4 Comparação entre as energias envolvidas na nucleação homogénea e heterogénea.

Para que ocorra nucleação heterogénea, o agente nucleante do cristal, a impureza (parede do recipiente) terá que ser banhado pelo metal líquido. O líquido deverá igualmente solidificar facilmente sobre o agente nucleante, como ilustrado na Figura 5. Na mesma é mostrado um agente nucleante, o substrato que é banhado pelo líquido a solidificar.

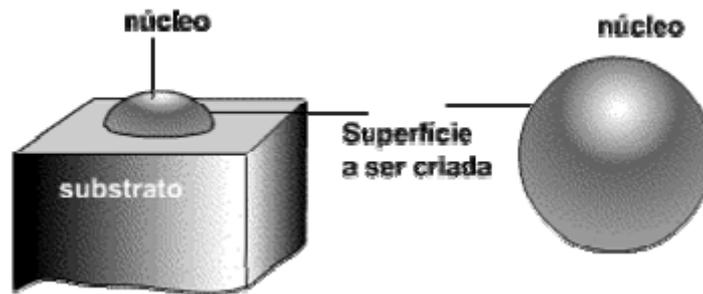


Figura 5 Superfície a ser criada pela nucleação a partir de um substrato.

A presença de qualquer tipo de substrato não é garantia de facilitar a nucleação, pois depende da tensão superficial entre núcleo e substrato, isto é, depende da junção entre ambos que, por sua vez, depende da composição química do núcleo e do substrato.

2.2.3. Dendrites

Sabe-se que para a maioria das condições de solidificação, a morfologia dendrítica é a característica dominante da microestrutura. Microestruturas dendríticas finas em fundidos, caracterizadas pelos espaçamentos dendríticos, são reconhecidas pelas suas propriedades mecânicas superiores, particularmente quando se considera a resistência à tracção e ductilidade.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para definir os factores que afectam a formação dessas estruturas dendríticas e que mostram relações entre espaçamentos

dendríticos como: concentração de soluto (C_0), Velocidade liquidus (V_L), taxa de arrefecimento (T) e gradiente térmico (GL).

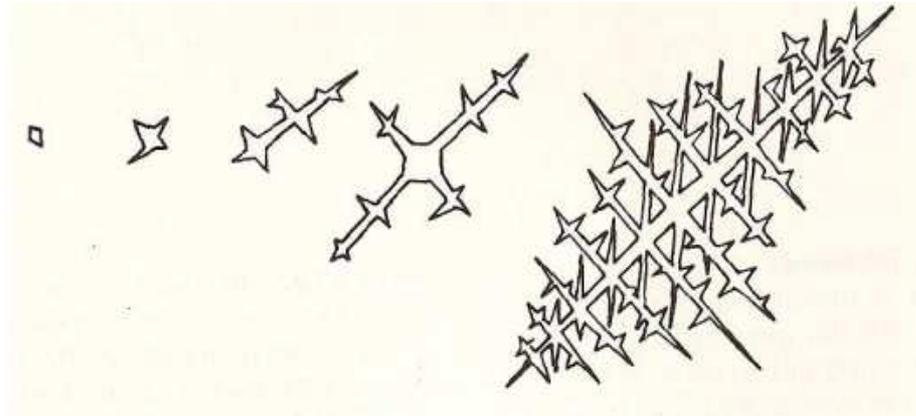


Figura 6 Dendrite originada na solidificação.

A Figura 6 mostra o desenvolvimento e a expansão de cada núcleo de cristalização, originando um tipo de cristal que poderia ser semelhante a uma árvore com os seus ramos; a esse tipo de cristal dá-se o nome de dendrite.

As dendrites formam-se em quantidades cada vez maiores até se encontrarem; o seu crescimento é, então, impedido pelo encontro das dendrites vizinhas, originando-se os grãos e os contornos de grãos, que delimitam cada grão cristalino, formando a massa sólida.

2.2.4. Modificação do Silício

No caso das ligas de Al-Si as suas propriedades estão muito relacionadas, com o tamanho, distribuição da fase secundária das partículas de silício, morfologia dos grãos de alumínio primário, DAS e porosidades [12]. Este tipo de liga, neste caso Al-Si pode apresentar um volume de eutético entre 50 a 90%. Com o objectivo de melhorar as propriedades mecânicas, as ligas são geralmente sujeitas a um tratamento de modificação do

silício eutético, o qual permite a transformação de uma morfologia acicular em fibrosa [13, 14].

Para Gruzleski e Closset [15], de entre os vários constituintes presentes na microestrutura das ligas de Al-Si, o mais importante é o constituinte eutético de silício para as propriedades mecânicas, nomeadamente a sua morfologia.

2.3. Afinação de grão e modificação do silício por adição química

Apesar de ser muito usado na fundição de ligas de alumínio, os mecanismos de afinação de grão por adição de nucleantes não são ainda totalmente conhecidos [16]. Pode variar de fundição para fundição, levando a resultados diferentes na microestrutura final de ligas semelhantes, podendo não existir afinação até afinação total da liga. A afinação de grão pelas técnicas actuais faz aumentar a densidade de microporosidades da matriz, diminuindo a dimensão dos poros, através de mecanismos para os quais não existe consenso entre os investigadores [16].

No caso da modificação do silício, quando são adicionados às ligas de Al-Si os modificadores químicos, estes afectam o crescimento do silício, alterando a sua morfologia de uma forma acicular grosseira para uma forma mais fina e fibrosa.

2.3.1. Tipos de afinadores de grão

Existem bastantes tipos de afinadores/nucleantes utilizados para o afinamento das ligas Al-Si. Entre estes afinadores estão ligas-mãe dos sistemas Al-Ti, Al-Ti-B, Al-Ti-C e Al-

B, com composição variável, cuja selecção depende do maior ou menor grau de afinação que se pretenda e da composição do banho líquido. As quantidades que se devem adicionar devem ser pequenas para que não se verifique alteração da composição base da liga, mas, deve ser suficiente para que possa haver afinação do grão.

Uma alternativa às ligas-mãe é a utilização de sais ricos em Ti e B, do tipo K_2TiF_6 e KBF_4 [16], disponíveis em pastilhas, bastante mais baratos que as ligas-mãe. Mas, devido ao impacto ambiental que apresenta (formação de escórias ricas em K e F) e à variabilidade e inconsistência dos resultados da afinação, estão a ser abandonadas em detrimento da utilização de ligas-mãe [17].

2.3.2. Tipos de modificadores de silício eutético

Os elementos químicos mais comuns na fundição são o sódio e o estrôncio [18, 19]. O antimónio, geralmente classificado como um modificador, apresenta melhores resultados quando entendido como afinador de silício, porque juntamente com fósforo tem o poder de reduzir o tamanho do silício primário e eutético, não afectando a morfologia do mesmo.

Outro grupo de elementos conhecidos como modificadores são o cálcio, arsénio, lítio e enxofre [12]. Mas, estes elementos não são muito utilizados porque, juntamente com o antimónio, afectam a eficiência do sódio e/ou estrôncio, não favorecendo o aumento das propriedades. As implicações que a sua utilização têm na saúde e segurança dos operários, e também como a não existência de métodos eficientes de adição, limitam muito a sua utilização.

Na escolha dos modificadores a opção entre a modificação por sódio ou estrôncio é determinada por vários factores. A modificação por sódio é considerada a mais eficiente, no entanto, o rápido *fading*, a grande quantidade de fumo e o difícil controlo da operação de adição, tem conduzido a maioria das fundições a optar pela modificação por estrôncio [15]. O

maior problema encontrado no uso de estrôncio como agente modificador é a instabilidade na morfologia do silício resultante, causada por pequenas variações de adição [20].

2.4. Afinação de grão e modificação do silício por ultra-sons

No caso da afinação de grão, a vibração por ultra-sons pode afectar a nucleação de várias maneiras. Sendo a temperatura de liquidus da liga função da pressão, pode-se afirmar que a temperatura de liquidus diminui com o aumento de pressão. Se a energia acústica for aplicada num um banho próximo da temperatura de liquidus, algumas zonas podem ser sobreaquecidas e outras sobrearrefecidas. Em cada zona, o banho sofre alterações desde sobrearrefecimento a sobreaquecimento a altas frequências. Isto resulta na formação de um maior número de núcleos sólidos.

Outra possibilidade poderá dizer-se que os afinadores de grão adicionados ao banho podem também ser afectados pelas vibrações causadas pelos ultra-sons, uma vez que uma partícula pode agir como um núcleo e, este é mais efectivo sob um certo sobreaquecimento e sobrearrefecimento. A nucleação pode ocorrer no banho a uma temperatura superior à temperatura liquidus, correspondendo ao aumento de pressão atmosférica. Já foi referido que o tamanho de grão pode ser reduzido quando existem vibrações acústicas aplicadas a temperaturas superiores à temperatura liquidus [1].

Eskin [2] mostrou que o tratamento por ultra-sons num banho em regime de cavitação pode produzir uma nova estrutura não dendrítica, ou seja, globular. O requisito fundamental para se obter uma estrutura deste género, consiste no aumento de intensidade na nucleação e, formação de um grande número de núcleos de cristalização. Isto, pode ser feito pela molhabilidade das impurezas não metálicas do banho, por acção de cavitação. A principal vantagem destas estruturas globulares reside no aumento da ductilidade do metal, sem que haja diminuição das suas tensões máximas de cedência e rotura.

No caso da modificação do silício, a tecnologia ultrasónica, que consiste em fornecer ao banho energia acústica para promover vibração de alta frequência e cavitação, para além da afinação da fase primária de alumínio, apresenta-se como uma alternativa à modificação do silício eutético nas ligas Al-Si. A conjugação destes dois efeitos conduz a propriedades mecânicas superiores às obtidas com afinação e modificação por via química tradicional [21]. Mas, a investigação científica em torno da modificação do silício com uso de ultra-sons é bastante diminuta, e está actualmente em fase de desenvolvimento à escala laboratorial.

2.4.1. Fragmentação dendrítica

As ondas de choque originadas pela vibração acústica e a convecção podem originar a fragmentação dendrítica durante a solidificação do banho, causado pela fusão das raízes dendríticas, onde os solutos são altamente segregados. A fusão destas raízes pode resultar num aumento de temperaturas localizado. A difusão de soluto para fora da dendrite, pode originar a redução da concentração de soluto e o aumento da temperatura local. Este efeito também pode levar à fusão das raízes dendríticas.

A vibração por ultra-sons também provoca a agitação do banho, o que leva à fragmentação dendrítica. Além disso, variações de pressões locais levam à fusão dessas raízes dendríticas, originando uma melhor microestrutura, com pequeno tamanho de grão e homogénea [1].

2.4.2. Cavitação acústica

Um dos grandes pré-requisitos para um tratamento de sucesso do banho com o uso dos ultra-sons é o desenvolvimento de cavitação acústica. Aqui, pressões alternadas no metal líquido geram um enorme número de cavidades no banho. A aplicação de uma pressão alternada, entre 0.8 e 1.0 MPa, leva à propagação de uma onda de ultra-sons, quebrando o

metal líquido em partes e originando descontinuidades que geram espaços de cavitação. Estes espaços formados são bolhas que se situam em zonas de quebra. Parte das bolhas formadas por cavitação não têm tempo para se preencherem com gás solvido no banho e acabam por colapsar, graças à acção de compressão das ondas acústicas. Neste caso, as pressões podem atingir 1000 MPa e originar flutuações com velocidades na ordem dos 100 m/s [2].

O processo de cavitação começa intensivamente com a fragmentação das cavidades. Acredita-se que a cavitação acústica no líquido desenvolve-se pelo principio de reacção em cadeia, onde as cavidades formadas nos diferentes núcleos são multiplicadas depois de alguns microsegundos, produzindo uma cavitação funcionalmente activa perto da fonte de ultra-sons. O tamanho desta zona depende da dimensão do radiador de ultra-sons e das propriedades dos líquidos. A cavitação produz pequenas flutuações e ondas de choque na interface líquido/sólido, promovendo uma erosão localizada, responsável pela limpeza por ultra-sons e fragmentação dendrítica, por exemplo [2]. O fenómeno de cavitação acústica consegue atingir a máxima eficiência na zona de pressões negativas de um ciclo ou série de ciclos, e a nucleação segue também como resultado da modificação do equilíbrio de temperaturas, causado pela alteração de pressões durante o colapso das bolhas de cavitação, ou como resultado do arrefecimento das bolhas por evaporação durante o seu crescimento. Sob estas circunstâncias, a cavitação pode ocorrer em vários pontos no interior do líquido, ou na parede da moldação, a uma frequência de 50 vezes por segundo [22].

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Materiais

Os materiais utilizados para a execução deste trabalho foram: liga de Al-Si de 2ª fusão (A356), areia, bentonite e água.

3.1.1. Liga

A liga utilizada neste trabalho foi uma liga de Al-Si de 2ª fusão (A356), com temperatura de líquidos (618,29 °C) e de sólidos (566,26 °C) respectivamente. Na Tabela 1 pode-se observar a sua composição química.

Elementos	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Sn	Ti
Composição	91,697	7,424	0,585	0,128	0,007	0,002	0,005	0,005	0,003	0,105

Tabela 1 Composição (% em peso) das ligas de alumínio para fundição.

3.1.2. Moldação

O processo utilizado foi moldação em areia verde que é responsável por mais de 60 % da produção mundial de fundidos. O sucesso do processo tem origem em factores como o baixo custo de produção, a simplicidade dos equipamentos e do processo, a possibilidade de

utilização com quase todas as ligas de fundição, bem como a capacidade de obtenção de fundidos com qualquer geometria e dimensão.

O material de moldação utilizado foi areia de sílica. Utilizou-se também um aglomerante (bentonite) que se usa para manter juntos os grãos de areia, bem como para dar e manter a consistência da moldação durante o armazenamento, transporte e fecho e para resistir à erosão provocada pela corrente de metal líquido durante o vazamento. Como propriedades essenciais deverá conferir à mistura uma boa permeabilidade, deverá ser facilmente desagregável quando o metal já esteja solidificado e deverá ter uma reacção limitada quando em contacto com o metal fundido.

Consegue-se a ligação entre os grãos de areia através da adição de água à mistura.

3.2. Equipamentos

3.2.1. Unidade de fusão

A unidade de fusão utilizada, Figura 7, foi um forno eléctrico de resistências, equipado com um cadinho de carboneto de silício (SiC) e com 1 litro de capacidade.



Figura 7 Forno de resistências e cadinho de carboneto de silício.

3.2.2. Ultra-sons

O ultra-som utilizado para este trabalho é constituído por um gerador de ultra-sons de 1.2 kW, um transdutor de frequência variável entre 18 a 25 kHz e um radiador acústico com geometria adequada para este tipo de ensaios. Os parâmetros do processo são totalmente controlados por computador, a partir de uma aplicação informática.

O equipamento de ultra-sons utilizado é uma unidade de multi-frequência modulada e multi-modal, que se distingue dos equipamentos convencionais devido à sua capacidade de adaptação ao meio e minimização dos problemas de atenuação da energia acústica. Assim, consegue-se garantir uma melhor eficiência de tratamentos, pois garante que os parâmetros de funcionamento, nomeadamente a frequência e o comprimento de onda sejam sensivelmente constantes. Os equipamentos utilizados podem ser observados na Figura 8.

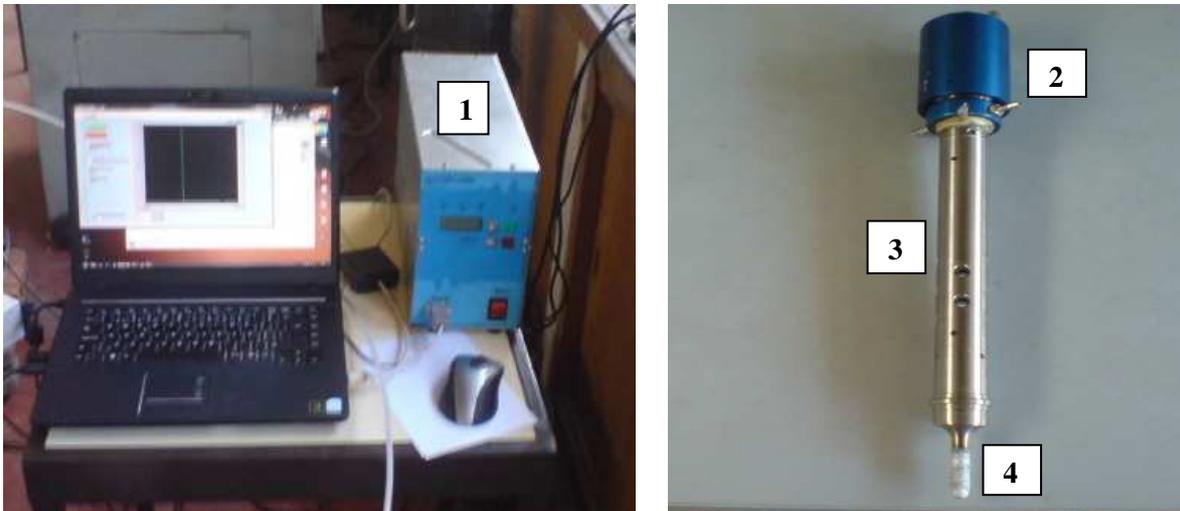


Figura 8 (1) Gerador de Ondas; (2) Conversor acústico; (3) Waveguide; (4) Radiador acústico.

3.2.3. Termopares

Os termopares são sensores de medição de temperatura que são constituídos por dois condutores metálicos e distintos, puros ou homogêneos. São baratos, podem medir uma vasta gama de temperaturas e podem ser substituídos sem introduzir erros relevantes. A sua maior limitação é a exactidão, uma vez que erros inferiores a 1 °C são difíceis de obter. A junção de dois metais gera uma tensão eléctrica que é função da temperatura. O funcionamento dos Termopares é baseado neste fenómeno, conhecido como o Efeito de Seebeck e define-se como a produção de uma diferença de potencial (tensão eléctrica) entre duas junções de condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando eles estão a diferentes temperaturas (força electromotriz térmica).

Neste trabalho foi medida a temperatura em lugares específicos para facilitar a interpretação dos resultados.

Os termopares foram inseridos cerca de 10 mm no molde (Figura 9), para posterior análise térmica.

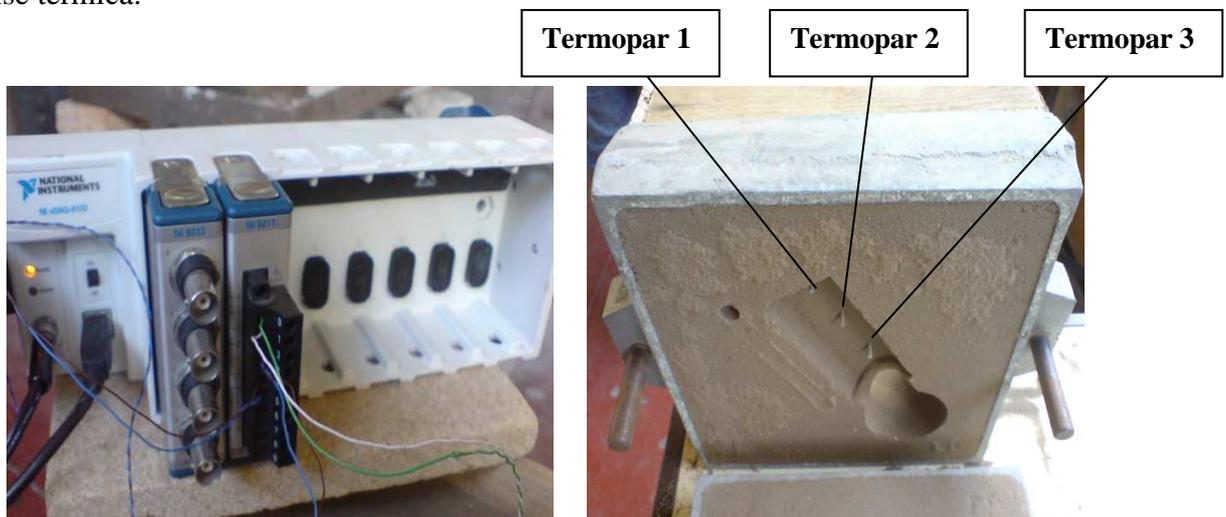


Figura 9 Equipamento utilizado CompactDAQ (da National Instruments) e termopares.

3.2.4. Alimentadores

O arrefecimento de um metal, desde a sua temperatura de fusão até à temperatura ambiente é normalmente acompanhado por uma redução de volume significativa, que em fundição se designa por contracção.

O objectivo do uso de alimentadores é assegurar o fornecimento de metal líquido à peça, para compensar a contracção do metal durante a solidificação. Para isso é necessário que:

- a solidificação da peça seja dirigida de forma a que não fiquem bolsas de metal líquido isoladas na peça;
- o alimentador seja a última zona a solidificar;
- o alimentador tenha um volume capaz de fornecer a quantidade de metal suficiente para compensar a contracção.

3.2.5. Sistema de enchimento

No processo de fundição, o metal líquido entra na cavidade da moldação através de um sistema de canais que constituem o designado sistema de enchimento. Mais do que um conjunto de canais de transporte de metal líquido, o sistema de enchimento garante que o escoamento de metal se efectua de forma controlada, condição absolutamente necessária, mas não suficiente, para obtenção de fundidos isentos de defeitos.

Para além de conduzir o metal à cavidade moldante, o sistema de enchimento regula a forma como o metal entra nessa cavidade, impedindo que o enchimento seja efectuado de forma turbulenta, e evitando o aparecimento de um conjunto de defeitos típicos de escoamentos turbulentos e descontrolados. Por outro lado, o sistema de enchimento deverá ser capaz de reter inclusões não metálicas que possam ter entrado na moldação durante o vazamento.

Para cumprir os seus requisitos, o sistema de enchimento compreende um conjunto de elementos com funções diferentes. A Figura 10 mostra o sistema de enchimento e o alimentador proposto para este trabalho.

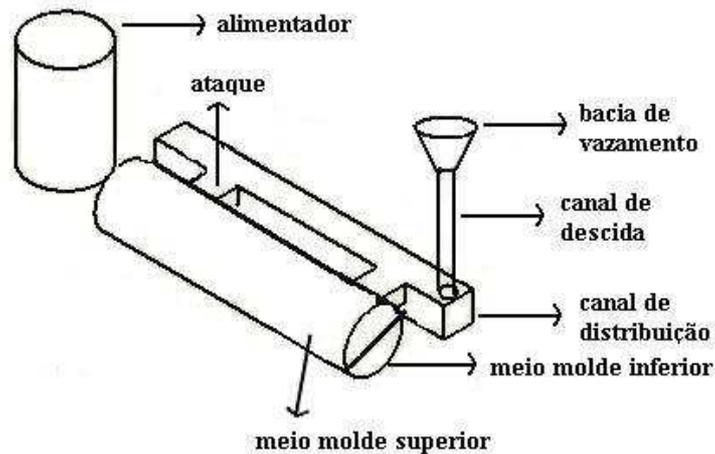


Figura 10 Esquema do sistema de enchimento e o alimentador.

3.3. Metodologia experimental

3.3.1. Elaboração da moldação

A elaboração das 6 moldações foi composta várias etapas. Inicialmente teve-se de preparar a areia de sílica. Esta fase de preparação decorre numa máquina misturadora (galga), que permite a mistura da areia, bentonite para dar consistência e água. A adição de água à areia é feita de modo lento e pausado por forma a permitir uma distribuição homogénea da mesma na areia, isto para se garantir uma humidade constante em toda a areia.

Posicionou-se o meio molde inferior, o canal de distribuição e ataque na meia caixa de moldação respectiva, tendo o cuidado de manter as distâncias equidistantes em relação às paredes da caixa, Figura 11.



Figura 11 Meio molde inferior, canal de distribuição e ataque na meia caixa de moldação.

Depois de posicionados fez-se o enchimento progressivo da meia caixa de moldação inferior com a areia, após o que, a areia é calcada manualmente com uma ferramenta própria. De referir ainda que, interessa especialmente que a moldação esteja muito bem calcada em torno de toda a zona onde irá ser vazado o material, de modo a preencher todos os espaços livres uniformemente, pois será essa zona que irá definir os contornos finais da peça que se pretendem o mais aproximados possível da peça final;

Depois de pronta a meia caixa de moldação inferior posiciona-se a meia caixa de moldação superior por cima e coloca-se o alimentador, o meio molde superior, o canal de descida e a bacia de vazamento nos respectivos lugares, Figura 12.

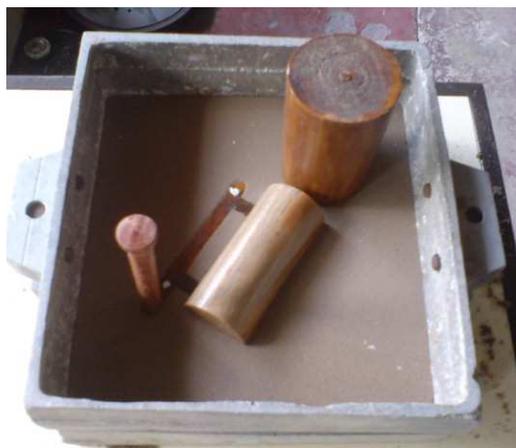


Figura 12 Imagem do sistema de enchimento e o alimentador.

Faz-se o resto do enchimento da caixa de moldação com areia, e quando finalizada, separam-se as duas meias caixas e retiram-se os seus componentes, Figura 13.

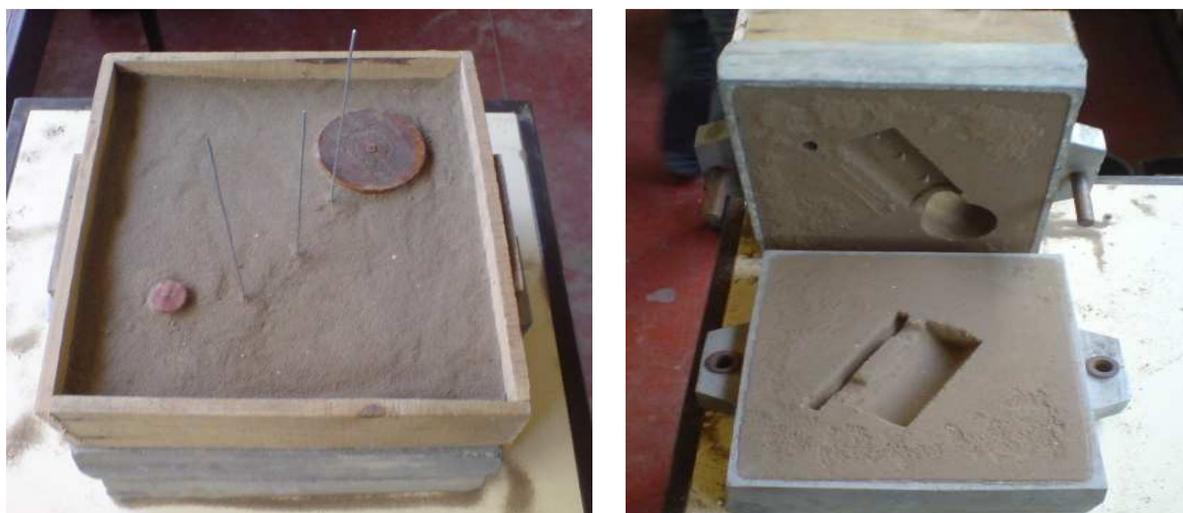


Figura 13 Esquema final antes do vazamento.

3.3.2. Dimensionamento e construção dos vários componentes da moldação

No decorrer deste trabalho foram dimensionados e construídos por processos de maquinagem (torneamento e fresagem), os vários componentes (moldes, alimentadores, canais de descida, canais de distribuição, ataque, bacia de vazamento) que fazem parte da moldação.

No início do trabalho foi proposto construir e utilizar três moldes com diâmetros de 30 mm, 45 mm e 60 mm e com um comprimento de 130 mm, Figura 14. Os 3 moldes foram construídos em madeira por processos de torneamento e fresagem no laboratório de maquinagem no departamento de engenharia mecânica.



Figura 14 Imagem dos 3 moldes com diâmetros de 30,45 e 60 mm e com um comprimento de 130 mm.

Seguidamente e através de uma aplicação informática e utilizando os diâmetros de 30,45 e 60 mm foram dimensionados os alimentadores, Figuras 15, 16, 17 e por processo de torneamento construídos em madeira Figura 18.

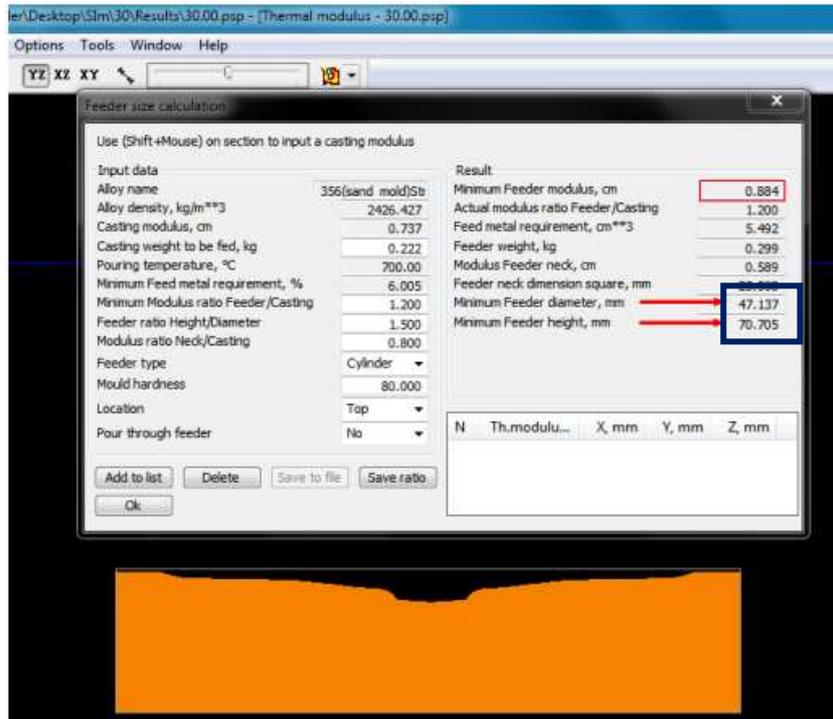


Figura 15 Dimensão do alimentador para 30 mm. Terá 71 mm de comprimento e 47 mm de diâmetro.

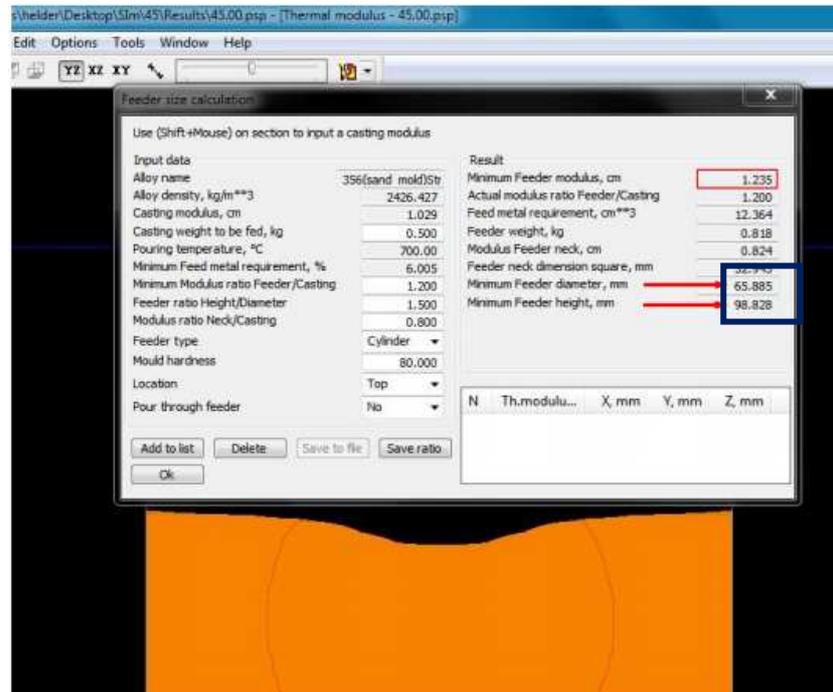


Figura 16 Dimensão do alimentador para 45 mm. Terá 99 mm de comprimento e 66 mm de diâmetro.

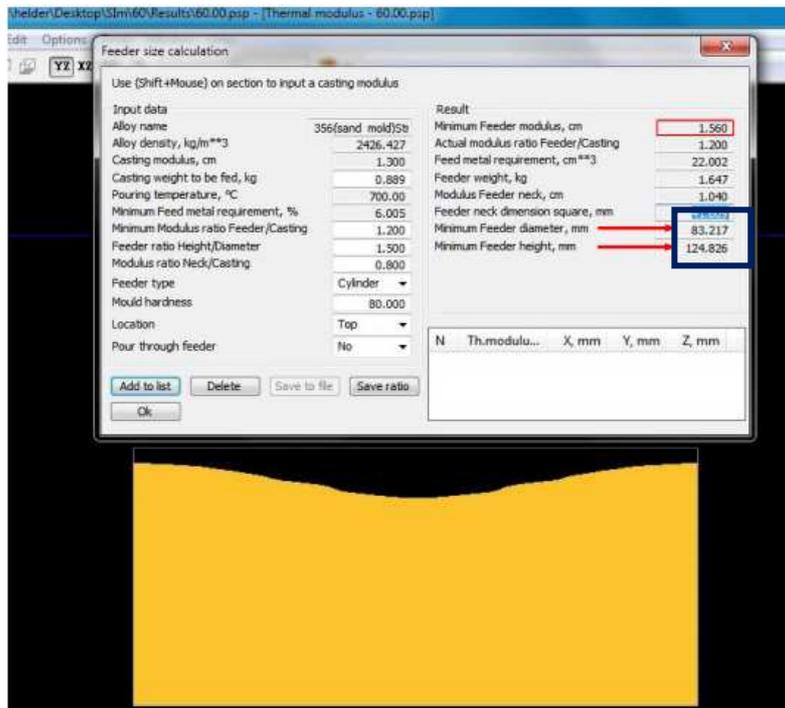


Figura 17 Dimensão do alimentador para 60 mm. Terá 125 mm de comprimento e 83 mm diâmetro.



Figura 18 Imagem final dos alimentadores.

Depois de elaborados os alimentadores, foram dimensionados e construídos (Figura 19) em madeira, por processos de fresagem e torneamento o sistema de enchimento que é composto por os canais de descida, canais de distribuição e ataque, para 30,45 e 60 mm.

Dimensionamento dos canais de descida, distribuição e ataques:

30 mm

Volume do conjunto: $V_t = V_p + V_a = 91.89 + 122.66 = 214.55 \text{ cm}^3$

$$V_p = \pi \times r^2 \times h = \pi \times 1.5^2 \times 13 = 91.89 \text{ cm}^3$$

$$V_a = \pi \times r^2 \times h = \pi \times 2.355^2 \times 7.07 = 122.66 \text{ cm}^3$$

Tempo de enchimento: 15 s

Escalonamento: 1 – 1 – 1

Comprimento do alimentador (Hi): 7.07 cm; Hf: 7.07-1.5 = 5.57 cm

Comprimento peça (molde): 13 cm

$$\left. \begin{array}{l} \text{Coeficiente perda de carga: } L_d = 6.07 \text{ cm} \\ L_0 = 13 \text{ cm} \end{array} \right\} L_m = L_0 + L_d = 13 + 6.07 = 19.07 \text{ cm}$$

Para este valor de $L_m = 19.07 \text{ cm} = 0.1907 \text{ m}$, o valor a considerar para o coeficiente de perda de carga será: $B = 1.9$

- **Secção do canal de descida:**

$$S_d = \frac{Vt \times B \times 2}{Te \times \sqrt{2g} \times \sqrt{Hi + Hf}}$$

$$S_d = \frac{214.55 \times 1.9 \times 2}{15 \times \sqrt{2 \times 9.8} \times \sqrt{7.07 + 5.57}}$$

$$S_d = 2.4 \text{ cm}^2$$

$$\text{Sendo, } S_d = \frac{\pi \times d^2}{4} \Leftrightarrow 2.4 = \frac{3.14 \times d^2}{4} \Leftrightarrow d = 1.7 \text{ cm} = 17 \text{ mm}$$

- **Secção do canal de distribuição:** Escalonamento: 1 – 1 – 1; $S_c = S_d = 2.4 \text{ cm}^2$

Uma vez que os lados são aproximadamente iguais e, para um canal de distribuição, teremos: $a = \sqrt{2.4} = 1.55 \text{ cm} = 15.5 \text{ mm}$

- **Secção de ataque:** Escalonamento: 1 – 1 – 1; $S_a = S_d = 2.4 \text{ cm}^2$

$$\text{Usando 2 ataques, fica: } S_a = \frac{2.4}{2} = 1.$$

$$\text{Usando } a=2b, \text{ fica: } S_a = b \times 2b = 2b^2$$

$$b = \sqrt{\frac{1.2}{2}} = 0.774 \text{ cm} = 7.74 \text{ mm}$$

$$a = 2 \times b = 2 \times 7.74 = 15.5 \text{ mm}$$

45 mm

$$\text{Volume do conjunto: } V_t = V_p + V_a = 206.75 + 335.97 = 542.72 \text{ cm}^3$$

$$V_p = \pi \times r^2 \times h = \pi \times 2.25^2 \times 13 = 206.75 \text{ cm}^3$$

$$V_a = \pi \times r^2 \times h = \pi \times 3.29^2 \times 9.88 = 335.97 \text{ cm}^3$$

Tempo de enchimento: 15 s

Escalonamento: 1 – 1 – 1

Comprimento do alimentador (Hi): 9.88 cm; Hf: 9.88-2.25 = 7.63 cm

Comprimento peça (molde): 13 cm

Coefficiente perda de carga: $L_d = 8.88 \text{ cm}$ } $L_m = L_0 + L_d = 13 + 8.88 = 22.88 \text{ cm}$
 $L_0 = 13 \text{ cm}$ }

Para este valor de $L_m = 22.88 \text{ cm} = 0.2288 \text{ m}$, o valor a considerar para o coeficiente de perda de carga será: $B = 1.9$

- **Secção do canal de descida:**

$$S_d = \frac{Vt \times B \times 2}{Te \times \sqrt{2g} \times \sqrt{Hi + Hf}}$$

$$S_d = \frac{542.72 \times 1.9 \times 2}{15 \times \sqrt{2 \times 9.8} \times \sqrt{9.88 + 7.63}}$$

$$S_d = 5.2 \text{ cm}^2$$

$$\text{Sendo, } S_d = \frac{\pi \times d^2}{4} \Leftrightarrow 5.2 = \frac{3.14 \times d^2}{4} \Leftrightarrow d = 2.5 \text{ cm} = 25 \text{ mm}$$

- **Secção do canal de distribuição:** Escalonamento: 1 – 1 – 1; $S_c = S_d = 5.2 \text{ cm}^2$

Uma vez que os lados são aproximadamente iguais e, para um canal de distribuição, teremos: $a = \sqrt{5.2} = 2.28 \text{ cm} = 22.8 \text{ mm}$

- **Secção de ataque:** Escalonamento: 1 – 1 – 1; $S_a = S_d = 5.2 \text{ cm}^2$

Usando 2 ataques, fica: $S_a = \frac{5.2}{2} = 2.6 \text{ cm}^2$

Usando $a=2b$, fica: $S_a = b \times 2b = 2b^2$

$$b = \sqrt{\frac{2.6}{2}} = 1.14 \text{ cm} = 11.4 \text{ mm}$$

$$a = 2 \times b = 2 \times 11.4 = 22.8 \text{ mm}$$

60 mm

Volume do conjunto: $V_t = V_p + V_a = 367.5 + 678.50 = 1046 \text{ cm}^3$

$$V_p = \pi \times r^2 \times h = \pi \times 3^2 \times 13 = 367.5 \text{ cm}^3$$

$$V_a = \pi \times r^2 \times h = \pi \times 4.16^2 \times 12.48 = 678.5 \text{ cm}^3$$

Tempo de enchimento: 15 s

Escalonamento: 1 – 1 – 1

Comprimento do alimentador (Hi): 12.48cm; $H_f: 12.48 - 3.0 = 9.48 \text{ cm}$

Comprimento peça (molde): 13 cm

$$\left. \begin{array}{l} \text{Coeficiente perda de carga: } L_d = 11.48 \text{ cm} \\ L_0 = 13 \text{ cm} \end{array} \right\} L_m = L_0 + L_d = 13 + 11.48 = 24.48 \text{ cm}$$

Para este valor de $L_m = 24.48 \text{ cm} = 0.2448 \text{ m}$, o valor a considerar para o coeficiente de perda de carga será: $B = 1.9$

- **Secção do canal de descida:**

$$S_d = \frac{Vt \times B \times 2}{Te \times \sqrt{2g} \times \sqrt{Hi + Hf}}$$

$$S_d = \frac{1046 \times 1.9 \times 2}{15 \times \sqrt{2 \times 9.8} \times \sqrt{12.48 + 9.48}}$$

$$S_d = 9.1 \text{ cm}^2$$

$$\text{Sendo, } S_d = \frac{\pi \times d^2}{4} \Leftrightarrow 9.1 = \frac{3.14 \times d^2}{4} \Leftrightarrow d = 3.4 \text{ cm} = 34 \text{ mm}$$

- **Secção do canal de distribuição:** Escalonamento: 1 – 1 – 1; $S_c = S_d = 9.1 \text{ cm}^2$

Uma vez que os lados são aproximadamente iguais e, para um canal de distribuição, teremos: $a = \sqrt{9.1} = 3.02 \text{ cm} = 30.2 \text{ mm}$

- **Secção de ataque:** Escalonamento: 1 – 1 – 1; $S_a = S_d = 9.1 \text{ cm}^2$

Usando 2 ataques, fica: $S_a = \frac{9.1}{2} = 4.55 \text{ cm}^3$

Usando $a=2b$, fica: $S_a = b \times 2b = 2b^2$

$$b = \sqrt{\frac{4.55}{2}} = 1.5 \text{ cm} = 15.1 \text{ mm}$$

$$a = 2 \times b = 2 \times 15.1 = 30.2 \text{ mm}$$



Figura 19 Canal de descida, canal de distribuição e dois canais de ataque.

3.3.3. Fusão e degaseificação

Em todos os ensaios realizados, as cargas foram colocadas no cadinho com peso pré-determinado no interior do forno, seguidamente fundidas, aquecidas até à temperatura de $700 \pm 10^\circ\text{C}$, e mantidas a essa temperatura, para homogeneizar o metal, durante 15 minutos. Após a homogeneização, procedeu-se à degaseificação com argon, durante 5 minutos e com um caudal de 5l/min. Após a fusão e degaseificação do material, o cadinho foi transportado até à moldação para posterior vazamento.

3.3.4. Ensaios sem ultra-sons

Após a fusão e degaseificação, o cadinho foi transportado até à moldação e a liga foi vazada a 700°C na moldação, Figura 20. Este ensaio foi sem recurso ao uso de afinação por ultra-sons. Durante a solidificação do metal líquido também foram medidas as temperaturas em determinados pontos do molde através dos termopares. Foram feitos 3 vazamentos, um para cada diâmetro (30 mm, 45 mm e 60 mm), respectivamente.



Figura 20 Vazamento sem recurso a ultra-sons.

3.3.5. Ensaios com ultra-sons

Após a degaseificação, a liga foi vazada a 700°C na moldação. Introduziu-se, então, a extremidade do radiador acústico no banho (entre 15 a 20 mm de profundidade), Figura 21 e iniciou-se o fornecimento de energia acústica, utilizando uma frequência de 19.8 ± 0.1 kHz e uma potência eléctrica de 250 W. Durante a solidificação do metal líquido também foram

medidas as temperaturas em determinados pontos do molde tais como nos ensaios sem ultra-sons. Foram também feitos 3 vazamentos, um para cada diâmetro (30 mm, 45 mm e 60 mm).



Figura 21 Vazamento da liga com recurso ao uso dos ultra-sons.

3.4. Técnicas de caracterização térmica e microestrutural

3.4.1. Caracterização térmica

A análise térmica foi elaborada com recurso ao uso de termopares, que foram inseridos 10 mm no molde, como foi referido anteriormente neste trabalho. Nos ensaios sem ultra-sons e com recurso aos ultra-sons, foram medidas as várias temperaturas (em três pontos), para facilitar a interpretação dos resultados das curvas de arrefecimento.

3.4.2. Caracterização microestrutural

Após arrefecimento até á temperatura ambiente, foram retiradas amostras e preparadas para caracterização microestrutural. Os cilindros obtidos foram cortados com um disco

abrasivo, de forma a obter três amostras por zonas (início, meio e fim) por cada ensaio, Figura 22. O molde tem 130 mm de comprimento e os provetes foram retirados com 10 mm de comprimento cada.

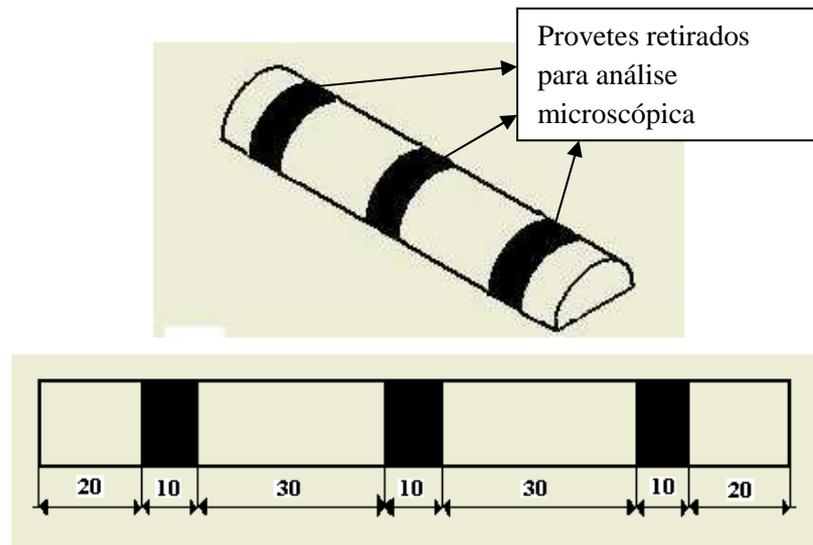


Figura 22 Esquema de representação da localização das amostras.

As superfícies de interesse foram sujeitas a um desbaste com lixas de SiC (grão 180, 320, 600, 1200 e 2400) e posterior polimento final em diamante com granulometria de 6 μm e 1 μm . O processo de limpeza foi feito com álcool etílico, seguido de secagem.

Com o auxílio do microscópio óptico foi feito o ensaio metalográfico no centro de cada provete.

Após a obtenção das imagens no microscópio óptico procedeu-se ao processamento das imagens obtidas e os trabalhos de medição (medição de áreas médias das partículas de silício, medição de SDAS e tamanho médio de grão) foram efectuadas com a aplicação informática Image-Pro Plus.

Utilizou-se a seguinte relação para calcular o tamanho médio de grão:

- Tamanho médio de grão $D = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}}$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Térmica

4.1.1. Sem vibração acústica

O alumínio foi vazado na moldação aos 700 °C (temperatura de vazamento). No momento do vazamento ligou-se o software labview, onde com os termopares se começou a medir as várias temperaturas de solidificação até chegar aos 566 °C (temperatura final de solidificação).

Nos gráficos, Figuras 23, 24 e 25, (termopar 1 é junto do canal de descida, termopar 2 no centro e termopar 3 junto do alimentador), pode-se constatar que o termopar 1 é o que leva menos tempo a solidificar, seguidamente termopar 2 e finalmente no termopar 3 é o que demora mais tempo a solidificar. Apesar de todos terem o mesmo tempo inicial de solidificação, o termopar 3 tem um tempo final de solidificação maior que o termopar 2 e o termopar 1, logo o tempo total de solidificação do termopar 3 será maior e demorará mais tempo a solidificar, como se pode verificar nos gráficos.

Também se pode constatar nos gráficos que dos três termopares o termopar 3 é o que tem uma maior temperatura inicial de solidificação, e o termopar 1 o que tem menor temperatura inicial.

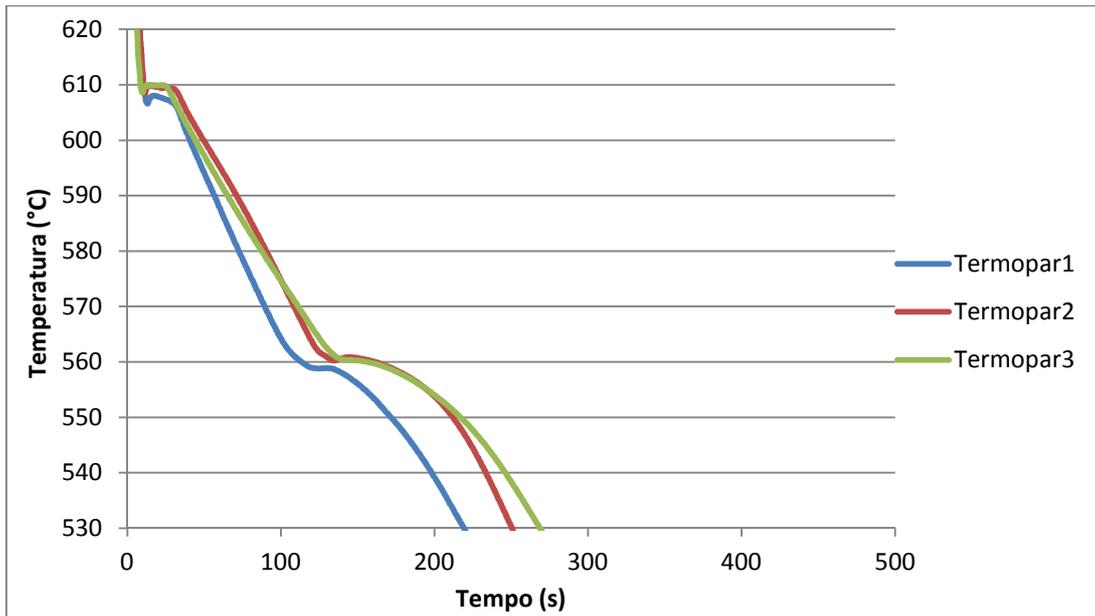


Figura 23 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 30 mm sem vibração acústica.

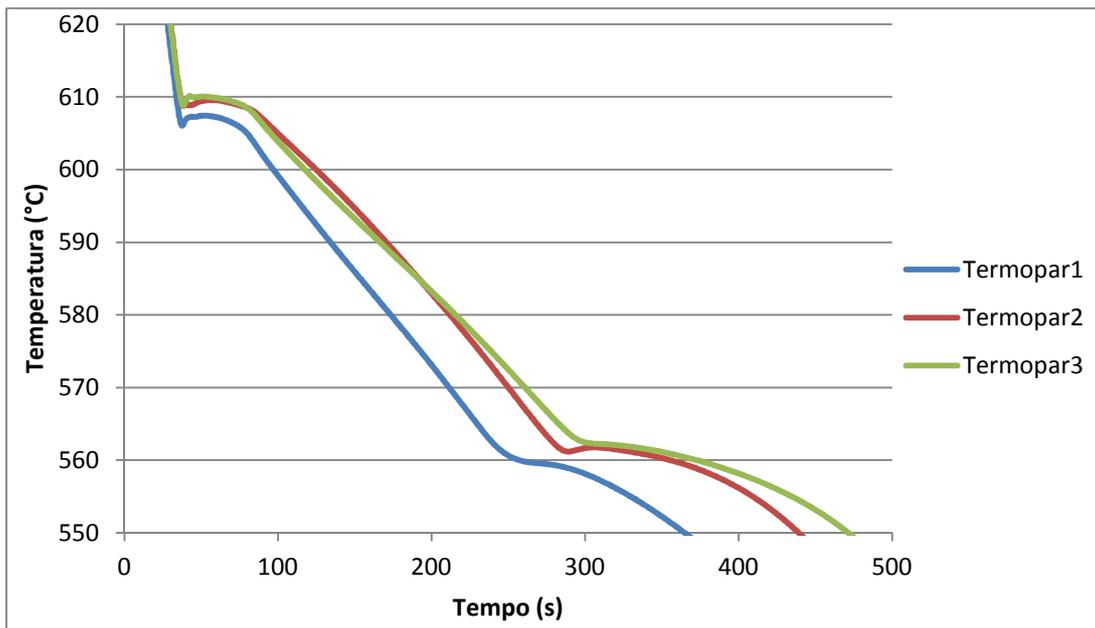


Figura 24 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 45 mm sem vibração acústica.

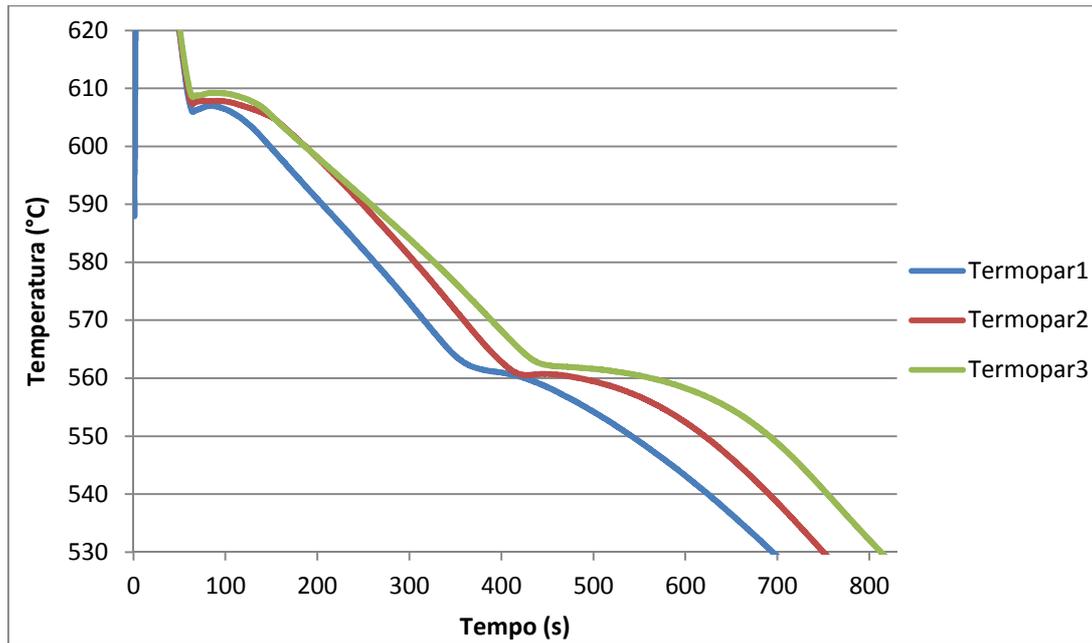


Figura 25 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 60 mm sem vibração acústica.

4.1.2. Com vibração acústica

Com vibração acústica o processo foi semelhante ao anterior (sem vibração acústica), a única diferença foi o uso do ultra-som. Ligou-se o ultra-som no início do vazamento e retirou-se por volta dos 580 °C antes de chegar aos 566 °C (temperatura final de solidificação).

Na análise dos gráficos, Figuras 26, 27 e 28, pode-se constatar que os resultados são similares ao processo sem ultra-som, visto que também o termopar 3 é o que demora mais tempo a solidificar e o termopar 1 o que demora menos tempo.

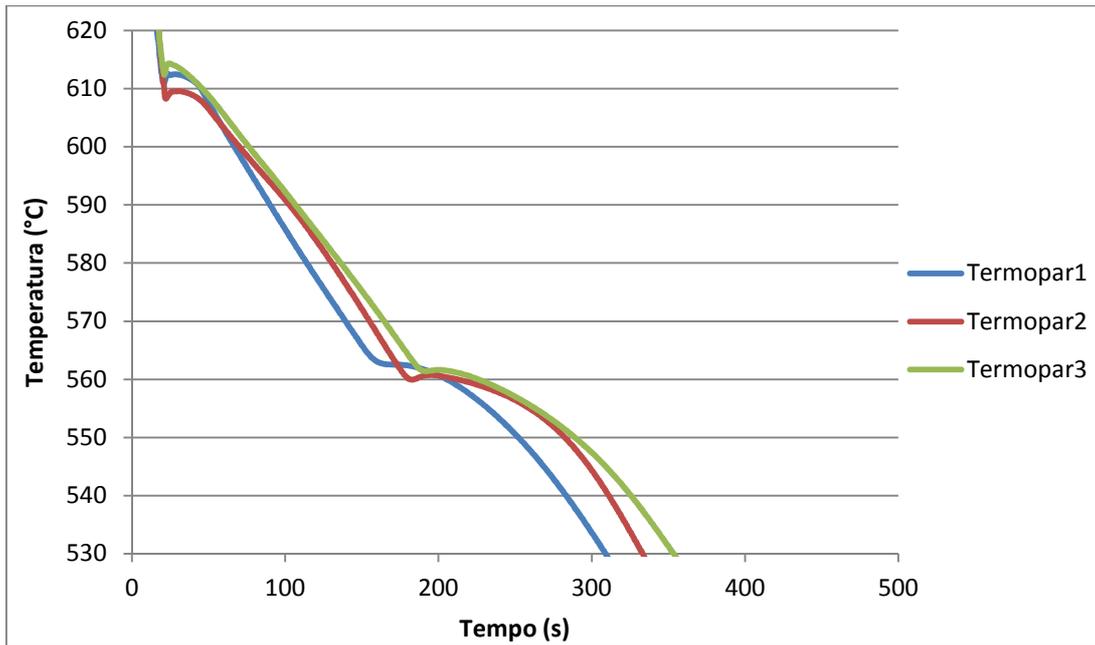


Figura 26 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 30 mm com vibração acústica.

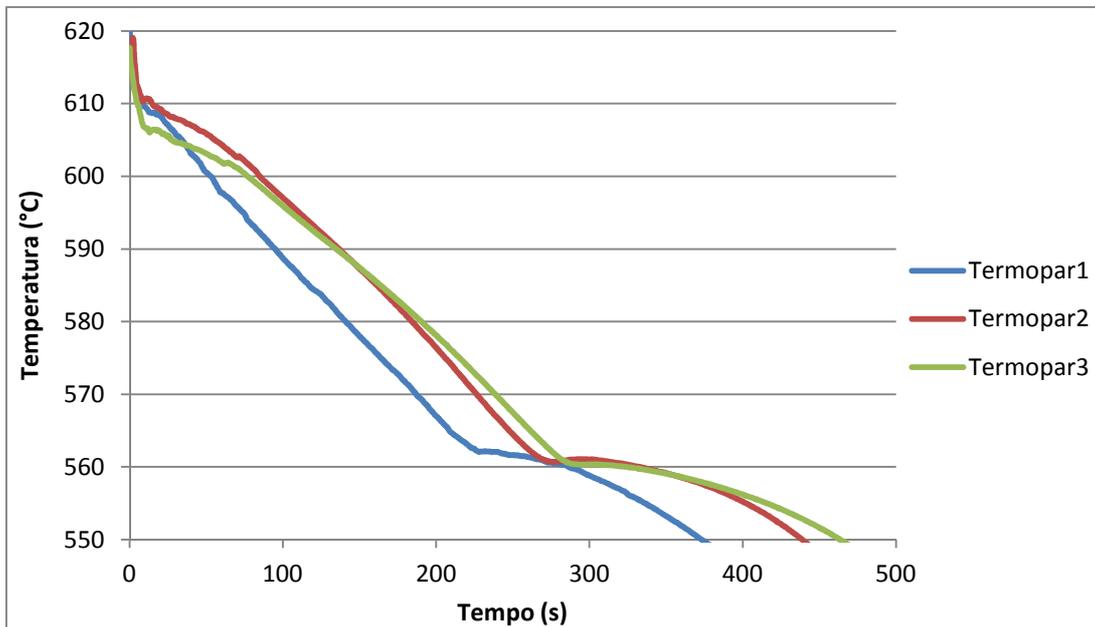


Figura 27 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 45 mm com vibração acústica.

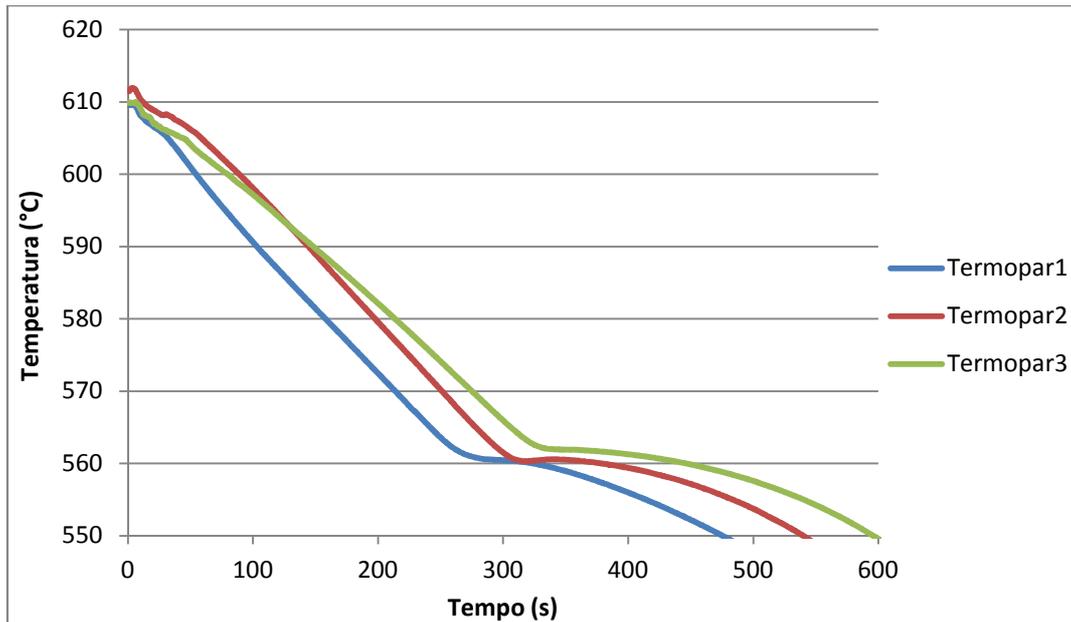


Figura 28 Curvas de arrefecimento para diâmetro de 60 mm com vibração acústica.

4.2. Microestrutura

As microestruturas representadas neste capítulo são relativas à região central, início e fim do fundido (ver Figura 22).

4.2.1. Sem vibração acústica

Diâmetro de 30 mm

A Figura 29 apresenta o ensaio realizado sem qualquer tipo de afinação de grão por vibração acústica para diâmetro de 30 mm.

Pode-se verificar a existência de dendrites, com um espaçamento dos braços dendríticos secundários (SDAS – Secondary Dendritic Arm Spacing) de cerca de 42,7 μm (a), 49,6 μm (b) e 52,4 μm (c). O tamanho médio de grão medido através do software IMAGE Pro-Plus é de 227,76 μm (a), 193,91 μm (b) e 177,85 μm (c). A área das lamelas de silício é de 275,47 μm^2 (a), 263,77 μm^2 (b) e 253,8 μm^2 (c).

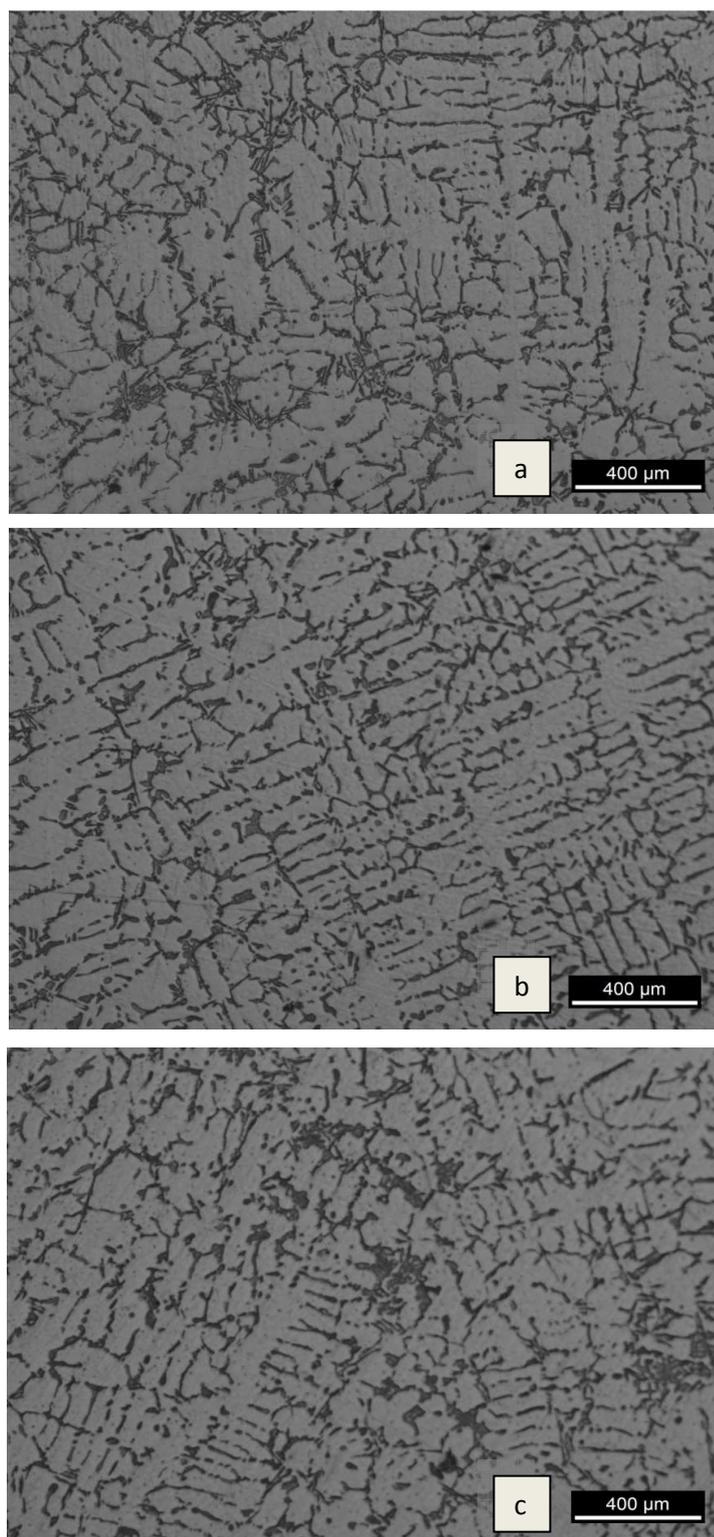


Figura 29 Microestruturas das amostras com diâmetro 30 mm, da Liga A356 sem qualquer tipo de afinamento de grão com amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).

Diâmetro de 45 mm

A Figura 30 apresenta o ensaio realizado sem qualquer tipo de afinação de grão por vibração acústica para diâmetro de 45 mm. Possui mais dendrites do que no ensaio anterior, com braços bastante alongados e, um espaçamento dos braços dendríticos secundários de cerca de 51,35 μm (a), 57,44 μm (b) e 61,17 μm (c). Apresenta um tamanho médio de grão inferior que o anterior de 210,15 μm (a), 185,36 μm (b) e 161,18 μm (c). As lamelas de silício têm uma área média de cerca de 412,13 μm^2 (a), 406,26 μm^2 (b) e 397,44 μm^2 (c).

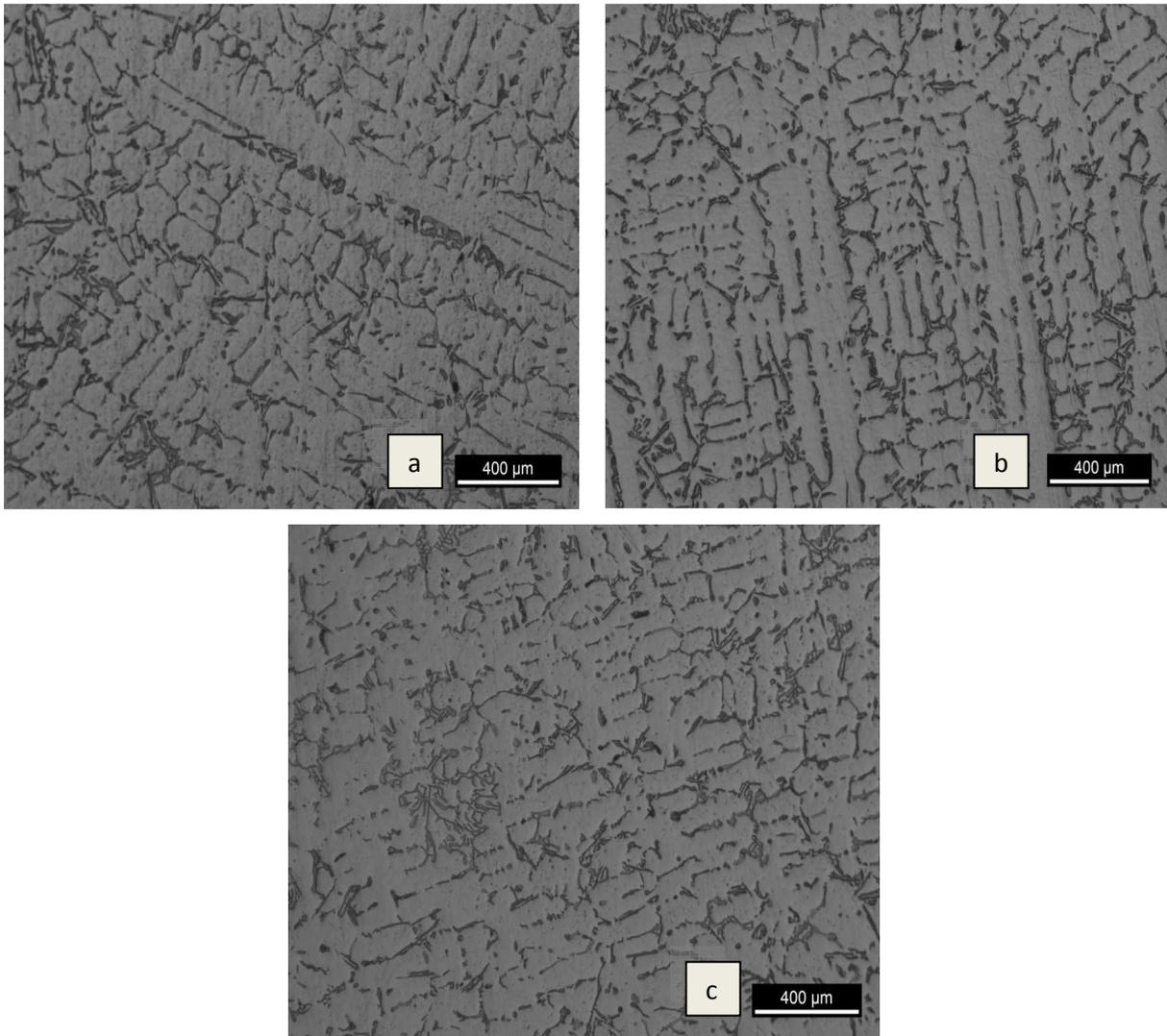


Figura 30 Microestruturas das amostras com diâmetro 45 mm, da Liga A356 sem qualquer tipo de afinação de grão com amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).

Diâmetro de 60 mm

A Figura 31 apresenta o ensaio realizado sem qualquer tipo de afinção de grão por vibração acústica para diâmetro de 60 mm. Pode-se verificar uma estrutura grosseira e heterogênea, com braços muito alongados e, um espaçamento dos braços dendríticos secundários (SDAS – Secondary Dendritic Arm Spacing) de cerca de 63,2 μm (a), 68,5 μm (b) e 73,48 μm (c). O tamanho médio de grão medido através do software IMAGE Pro-Plus é de 197,22 μm (a), 172,74 μm (b) e 148,34 μm (c). A área das lamelas de silício para este diâmetro é de 554,48 μm^2 (a), 543,46 μm^2 (b) e 518,29 μm^2 (c).

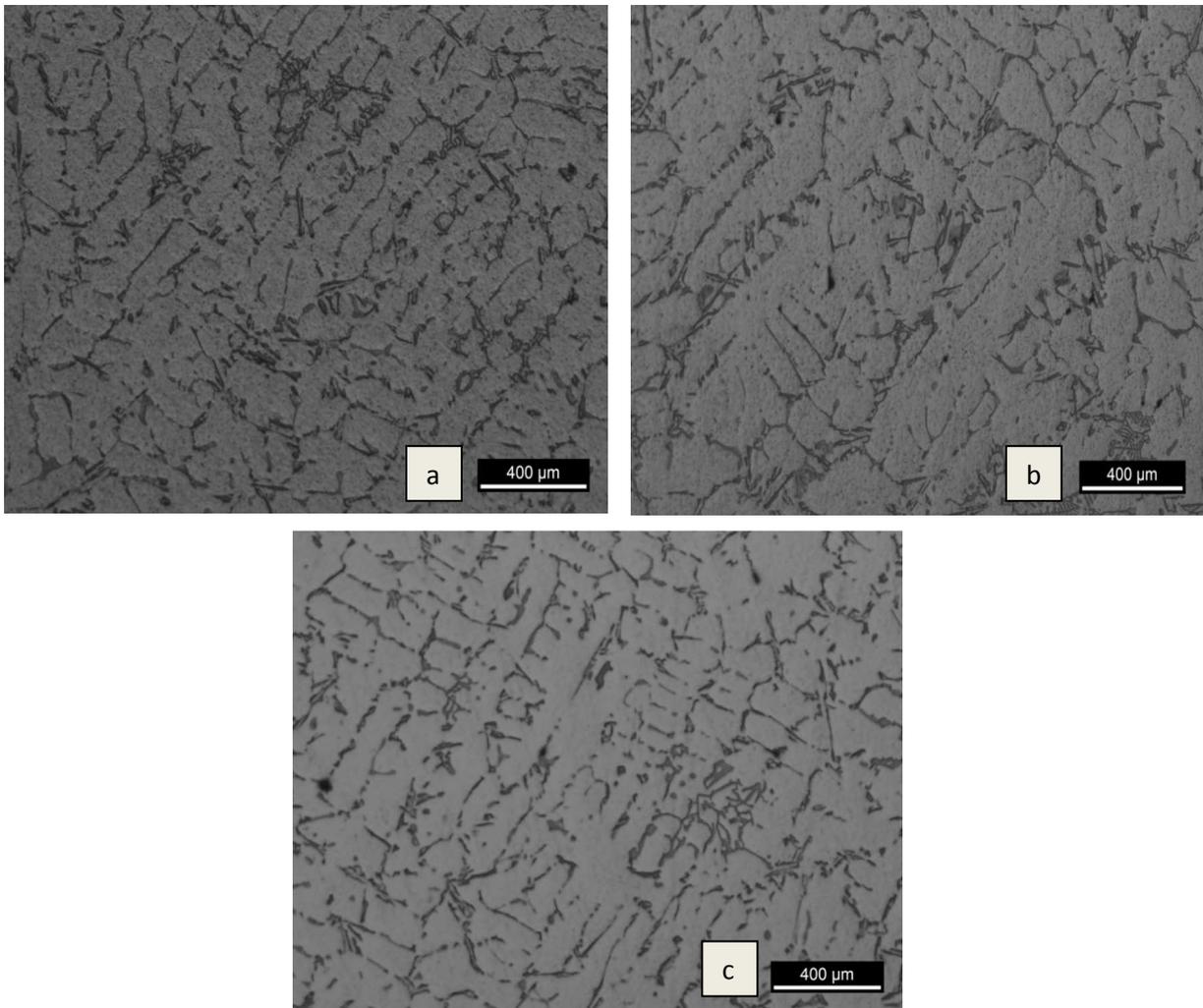


Figura 31 Microestruturas das amostras com diâmetro 60 mm, da Liga A356 sem qualquer tipo de afinção de grão com amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).

4.2.2. Com vibração acústica

Diâmetro de 30 mm

A Figura 32 representa a microestrutura obtida através de um tratamento por ultra-sons e uma potência eléctrica de 250 W, para uma temperatura de vazamento de 700 °C. A microestrutura apresenta alguma homogeneidade, sendo composta por alguns grãos globulares com tamanho médio de 186,64 μm (a), 130,61 μm (b) e 103,64 μm (c) e, ainda, presença de algumas dendrites. A área das lamelas de silício medido para esta amostra é de 260,52 μm^2 (a), 248,27 μm^2 (b) e 235,44 μm^2 (c).

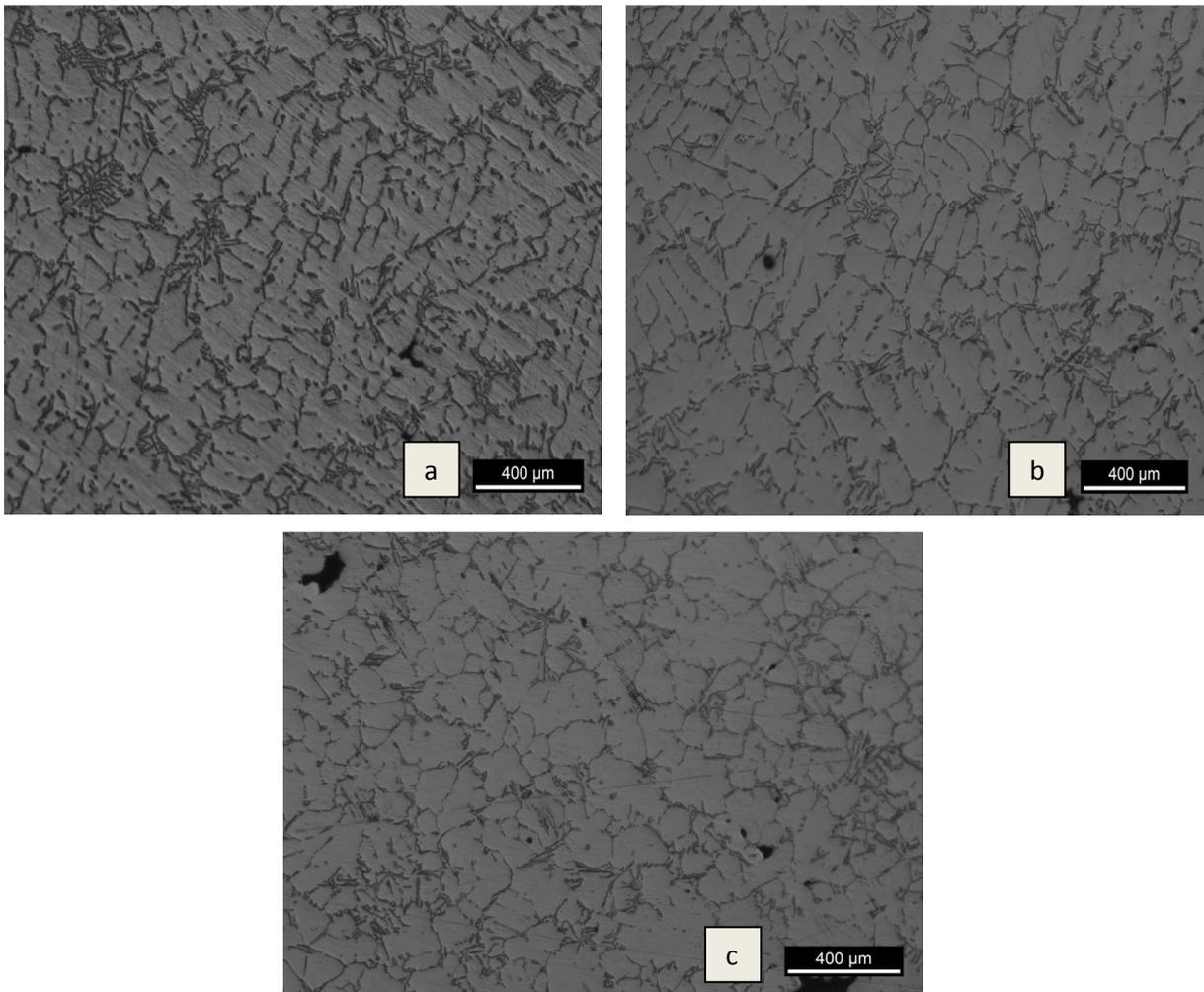


Figura 32 Microestruturas das amostras com diâmetro 30 mm, da Liga A356 com vibração acústica de 250 W e amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).

Diâmetro de 45 mm

A Figura 33 foi obtida através de um ensaio com vibração por ultra-sons, com potência eléctrica de 250 W. Através da análise visual pode-se observar também alguma homogeneidade, com tamanho médio de 180,83 μm (a), 146,77 μm (b) e 116,34 μm (c). Nesta figura, observa-se uma redução de estruturas dendríticas na matriz Al- α , que se pode dever a um fenómeno de fragmentação dendrítica ou nucleação heterogénea, induzida pela cavitação acústica. As lamelas de silício apresentam uma área média de 378,13 μm^2 (a), 346,88 μm^2 (b) e 331,65 μm^2 (c).

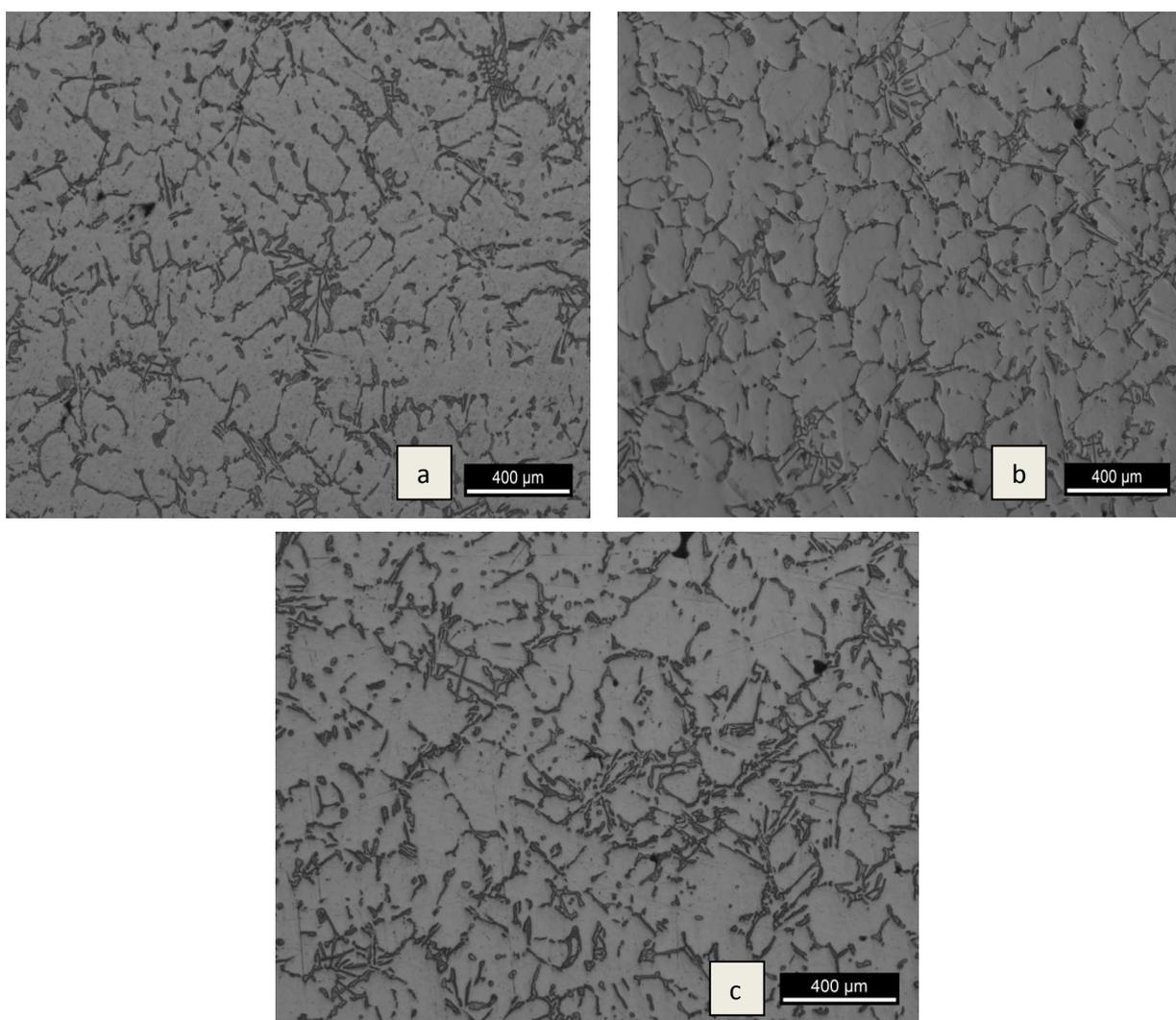


Figura 33 Microestruturas das amostras com diâmetro 45 mm, da Liga A356 com vibração acústica de 250 W e amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).

Diâmetro de 60 mm

A Figura 34 apresenta a microestrutura obtida a partir de um tratamento por vibração acústica, com uma potência eléctrica equivalente a 250 W. Analisando a figura, pode-se ver a redução de dendrites. O tamanho médio de grão situa-se nos 168,88 μm (a), 140,66 μm (b) e 109,11 μm (c). A área das lamelas de silício é de 518,01 μm^2 (a), 497,48 μm^2 (b) e 460,51 μm^2 (c).

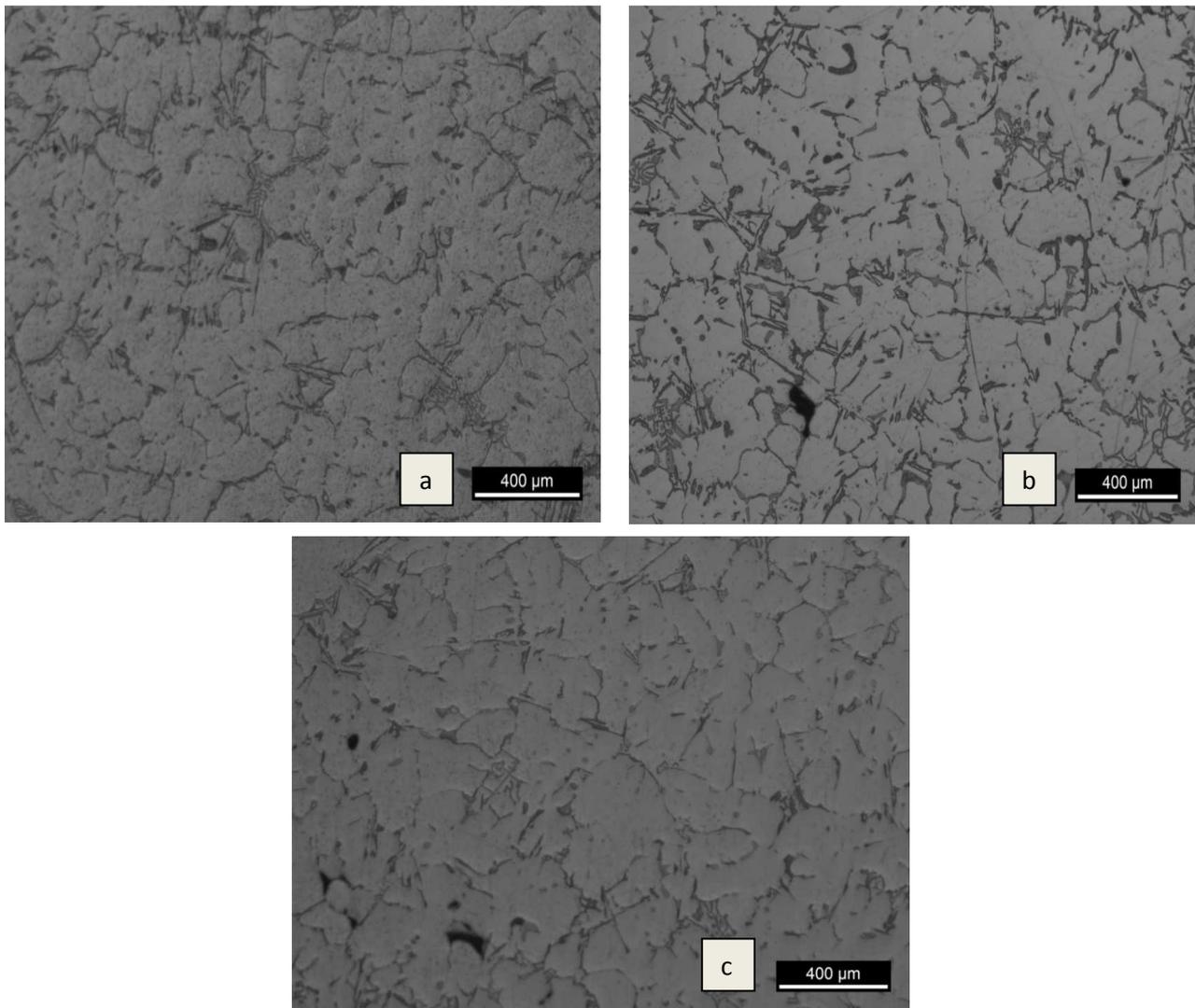


Figura 34 Microestruturas das amostras com diâmetro 60 mm, da Liga A356 com vibração acústica de 250 W e amplificação de 50X. (a, c extremidades; b centro).

A tabela seguinte corresponde à tabela-resumo das características morfológicas das microestruturas apresentadas anteriormente.

Diâmetro (mm)	Potência (W)	Tamanho Médio de Grão (μm)	Área Média das lamelas de Si (μm^2)
30 (a)	-	227,76	275,47
30 (b)	-	193,91	263,77
30 (c)	-	177,85	253,8
45 (a)	-	210,15	412,13
45 (b)	-	185,36	406,26
45 (c)	-	161,18	397,44
60 (a)	-	197,22	554,48
60 (b)	-	172,74	543,46
60 (c)	-	148,34	518,29
30 (a)	250	186,64	260,52
30 (b)	250	130,61	248,27
30 (c)	250	103,64	235,44
45 (a)	250	180,83	378,13
45 (b)	250	146,77	346,88
45 (c)	250	116,34	331,65
60 (a)	250	168,88	518,01
60 (b)	250	140,66	497,48
60 (c)	250	109,11	460,51

Tabela 2 Tabela-resumo das características morfológicas das microestruturas apresentadas anteriormente.

4.2.3. Efeito da potência eléctrica do ultra-som nas características morfológicas da microestrutura

Os gráficos apresentados nas Figuras 35, 36 e 37 representam o tamanho do grão, em diferentes regiões, início, meio e fim (Figura 22). Os gráficos referem-se aos ensaios com vibração acústica (250 W) e sem vibração acústica. Pela análise é possível perceber que os ultra-sons têm bastante influência na afinação de grão, relativamente às amostras não afinadas por vibração acústica. As microestruturas obtidas por vibração acústica apresentam menor tamanho de grão, relativamente àquelas não tratadas por ultra-sons. A potência acústica demonstra ser um parâmetro de grande importância uma vez que, promove uma maior eficiência na afinação de grão.

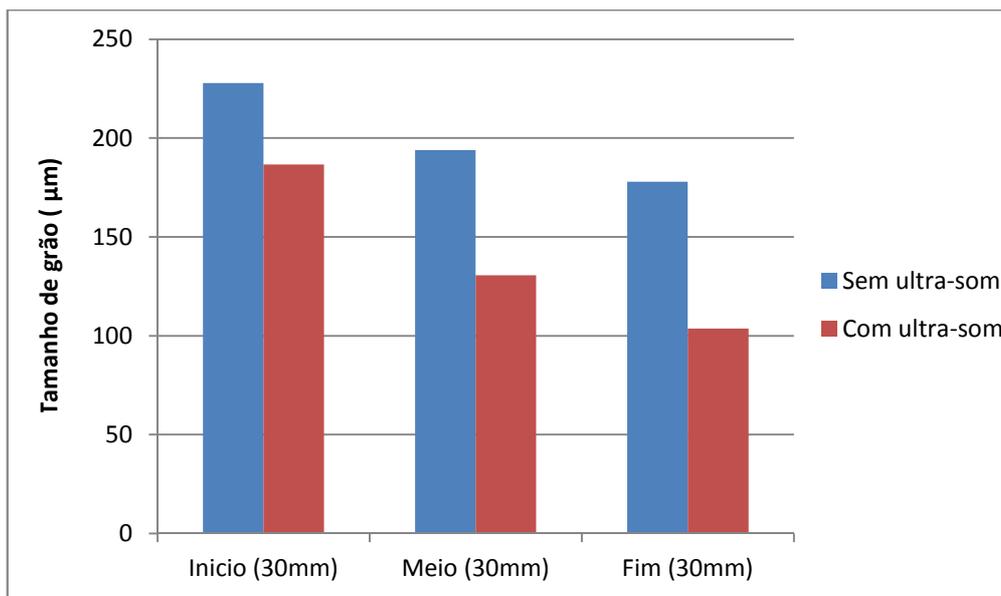


Figura 35 Relação do tamanho de grão com uso de ultra-sons e sem ultra-sons para diâmetro de 30 mm.

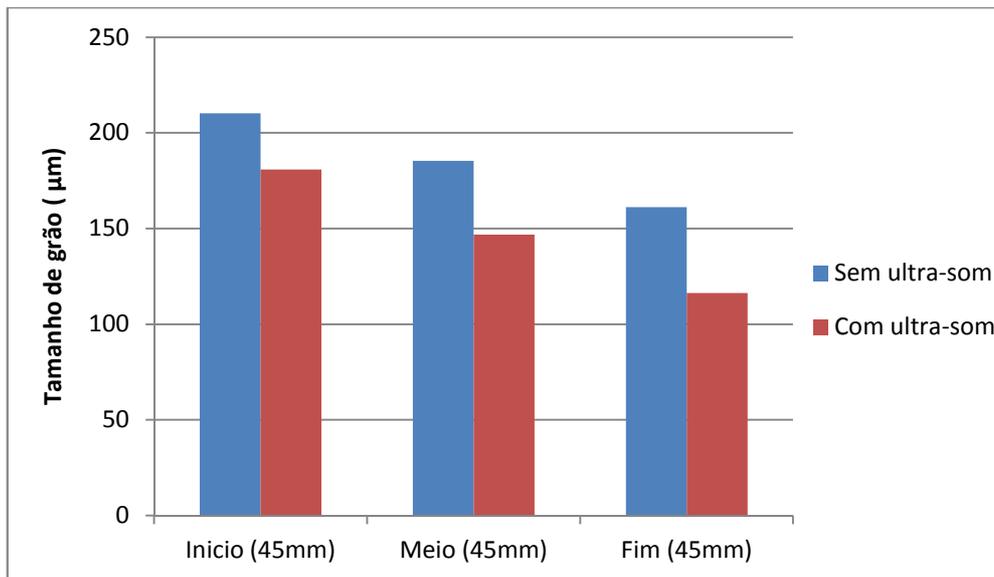


Figura 36 Relação do tamanho de grão com uso de ultra-sons e sem ultra-sons para diâmetro de 45 mm.

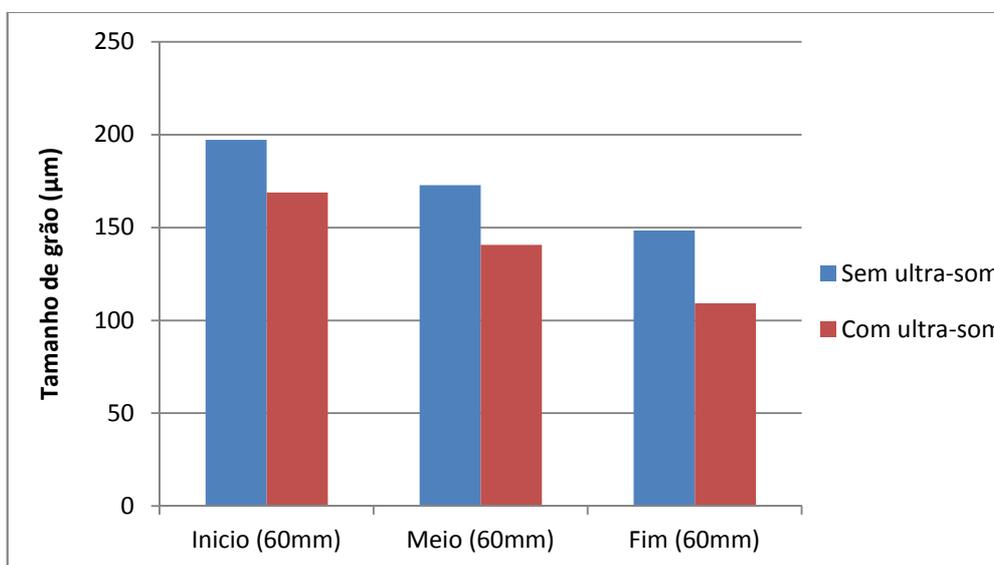


Figura 37 Relação do tamanho de grão com uso de ultra-sons e sem ultra-sons para diâmetro de 60 mm.

5. CONCLUSÕES

O principal objectivo deste trabalho consistiu no estudo da tecnologia de vibração por ultra-sons, e a avaliação da sua influência na morfologia microestrutural para a liga A356.

A utilização de vibração por ultra-sons ganha especial destaque por ser uma tecnologia de afinação de grão ambientalmente limpa.

A partir da análise dos resultados verifica-se que:

- O uso de árgon para degaseificação faz com que a liga melhore as suas propriedades ao eliminar os gases contidos na liga.

- A utilização de vibração acústica promove a fragmentação dendrítica, como se verifica pela análise das microestruturas.

- A energia acústica na solidificação tem grande importância na afinação de grão, uma vez que consegue diminuir o tamanho médio de grão.

- A velocidade de arrefecimento tem um impacto directo na morfologia do grão. Quanto maior for a velocidade de arrefecimento menor será o tamanho médio de grão.

- Na análise térmica pode-se verificar que quanto mais perto do alimentador, o tempo de solidificação será maior.

Como conclusão final podemos considerar o trabalho elaborado como satisfatório pois atingiu as expectativas que eram redução do tamanho médio de grão.

5.1. Propostas para trabalhos futuros

O conhecimento obtido através do desenvolvimento desta tese pode ser consideravelmente ampliados através de um trabalho mais exaustivo. Por agora ficam as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar o efeito do uso dos ultra-sons nas propriedades mecânicas através de ensaios de tracção.
- Efectuar simulações de análise térmica, recorrendo ao SolidWorks Flow Simulation.
- Elaboração de coquilhas metálicas com diâmetros de 30,45 e 60 mm para comparação com moldação em areia.
- Realização destes ensaios numa outra liga Al-Si de forma a dar continuidade e maior validade a este trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MEEK, T. T. et al. *Ultrasonic processing of materials*. University of Tennessee. 2006.
2. ESKIN, G. I. *Prospects of ultrasonic (cavitational) treatment of the melt in the manufacture of aluminum alloy products*. Metallurgist, v. 42, 1998.
3. KORI, S. A.; MURTY, B. S.; CHAKRABORTY, M. *Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium*. Materials Science and Engineering, v. A283, p. 94-104, 2000
4. JENG, S. C.; CHEN, S. W. *The solidification characteristics of 6061 and A356 aluminum alloys and their ceramic particle-reinforced composites*. Acta Mater., v. 45, n. 12, p. 4887-4899, 1997
5. LIOU, J. W.; LUI, T. S.; CHEN, L. H. *SiO₂ particle erosion of A356.2 aluminum alloy and the related microstructural changes*. Wear, v. 211, p. 169-176, 1997.
6. KEARNEY, A.; ROOY, E. L. *Properties and selection: Nonferrous alloy and special-purpose materials*. In: ASM Metals Handbook. The Materials Information Company, v. 2, 1990. ISBN 9ª Edição.
7. C. Y. JEONG, C. S. K. J. I. C. I. H. O. A. Y. C. K. *Effect of microstructure on mechanical properties for A356 casting alloy*. International Journal of Cast Metals Research, 21, 2008. 1-4.
8. MORARN, L.; MACUTA, S. *Acoustical degassing of molten aluminium*. SISOM. Bucureste: 2006.

9. ESKIN, G. I. *Principles of ultrasonic treatment: application for light alloys melts*. Advanced Performed materials, v. 4, p. 223-232, 1997.
10. XU, H.; MEEK, T. T.; HAN, Q. *Effects of ultrasonic field and vacuum on degassing of molten aluminum alloy*. Materials Letters, v. 61, p. 1246-1250, 2007.
11. ESKIN, G. I. *Cavitation mechanism of ultrasonic melt degassing*. Ultrasonics Sonochemistry, v. 2, 1995.
12. HEGDE, S. and K.N. PRABHU, *Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys*. Journal of Materials Science, 2008. **43**(9): p. 3009-3027.
13. FATAHALLA, N., M. HAFIZ, and M. ABDULKHALEK, *Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr*. Journal of Materials Science, 1999. **34**(14): p. 3555-3564.
14. SCHAEFER, M. and R.A. FOURNELLE, *Effect of strontium modification on near-threshold fatigue crack growth in an Al-Si-Cu die cast alloy*. Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 1996. **27**(5): p. 1293-1302.
15. GRUZLESKI, J.E. and B.M. CLOSSET, *The Treatment of liquid Aluminum-Silicon Alloys*. 1990, Des Plaines, IL, USA: American Foundryman Society.
16. SPITTLE, J. A. *Grain refinement in shape casting of aluminium alloys*. International Journal of Cast Metals Research, 19, 2006. 210-222.
17. R. COOK, P. S. C. M. A. K. *Benefits of master alloy melt treatments in the aluminium foundry industry*. Light Metals, 1996. 647-654.

18. DAHLE, A.K., K. NOGITA, J.W. ZINDEL, S.D. McDONALD, and L.M. HOGAN, *Eutectic nucleation and growth in hypoeutectic Al-Si alloys at different strontium levels*. Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 2001. **32**(4): p. 949-960.
19. HANNA, M.D., S.Z. LU, and A. HELLAWELL, *Modification in the Aluminum Silicon System*. Metallurgical Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 1984. **15**(3): p. 459-469.
20. FURLAN, T.S. and R. FUOCO, *Optimization of the Sr Addition in Permanent Mold A356 Alloys*, in *AFS Transactions*. 2008. p. 281-297.
21. ESKIN, G.I., *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*. 1998, Amsterdam, Netherlands: Gordon and Breach Science.
22. MORARN, L.; MACUTA, S. *Acoustical degassing of molten aluminium*. SISOM. Bucureste: 2006.