



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Projeto de superfícies bio inspiradas para a
otimização de fundição de estruturas finas.

Sandro Filipe Sousa Almendra

Sandro Filipe Sousa Almendra

Projeto de superfícies bio inspiradas para a
otimização de fundição de estruturas finas.



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sandro Filipe Sousa Almendra

Projeto de superfícies bio inspiradas para a
otimização de fundição de estruturas finas.

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Filipe Samuel Silva

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

Antoine Lavoisier

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar os meus agradecimentos vão para os meus familiares. A minha primeira e maior prece de agradecimento vai para os meus pais, pela possibilidade que me concederam na minha formação, bem como em todo o meu trajeto académico. Um forte obrigado para ti, Pai e também para ti Mãe pelo esforço e sacrifício que fizeram em prol do meu percurso académico.

Para ti, Ana Paula Ribas Rocha minha namorada, um forte e sincero Obrigado, pela força e coragem que me depositaste em todas as minhas opções tomadas. Sem dúvida, foste e és um grande pilar da minha sustentação pessoal.

Em segundo lugar a todos os intervenientes académicos que serviram de orientação. Para o Professor orientador Filipe Samuel Silva pelo acompanhamento e motivação, ao longo deste trajeto.

Ao Engenheiro Paulo Pinto, do laboratório de materiais funcionais, pelo enorme auxílio prestado na conceção das atividades experimentais e pela partilha da experiências e informações que cedeu na área de estruturas celulares metálicas, ao qual está envolvido.

Ao Engenheiro Óscar Carvalho, também do laboratório de materiais funcionais, pela criatividade e disponibilidade prestada no auxílio e resolução de determinadas dúvidas.

A todos os Professores do DEM, que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação, bem como para determinadas etapas na realização deste projeto.

Um grande agradecimento a todos os meus amigos/colegas do ramo de Engenharia Mecânica que me acompanharam ao longo destes anos, na Universidade do Minho e não só, pelo excelente espírito de camaradagem e aprendizagem que obtive com esta convivência.

A todos os meus amigos de infância, pela convivência e pela forte confiança depositada que me permitiram atingir bons momentos de diversão e felicidade, ao longo da minha vida.

Por último e sem esquecer ninguém, que mesmo indiretamente contribuiu para o meu patamar mais elevado, o meu sincero Obrigado.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem como principal finalidade a análise e otimização do processo de fundição em estruturas finas – estruturas celulares metálicas. Partindo de uma análise bio mimética inspirada no funcionamento dos elementos constituintes da natureza pretende-se desenvolver conceitos e aplicar esses mesmos princípios na área da tecnologia de fabrico. O principal objeto de estudo é o efeito que estruturas rugosas podem ter no comportamento de escoamento de fluidos, bem como a otimização da sua morfologia.

Pretende-se estudar e compreender o efeito que as superfícies rugosas das cavidades moldantes possam apresentar, no processo de transferência de calor e conseqüentemente na sua fluidez. O processo de fundição por cera perdida é o indicado para este tipo de estruturas, pois é dotado de boa qualidade dimensional e geométrica. São realizados alguns ensaios práticos de forma a analisar as fases de enchimento e respectivas taxas de solidificação durante a solidificação e enchimento do metal. Estes ensaios experimentais complementam diferentes níveis de rugosidade, para se compreender melhor a influencia deste fator. Utilizando como ligas de vazamento, respetivamente o alumínio (Al) e o bronze (CuSn), submetendo sempre o fluido a condições ideais de pressão e vácuo. São também apresentados alguns estudos relacionados com a transferência de calor e fundamentos teóricos que devem ser mencionados para que se possa adquirir uma maior sensibilidade na abordagem deste projeto. No final pretende-se determinar se a rugosidade pode influenciar, direta ou indiretamente este tipo de fundição, com o objetivo de otimizar o processo de fabrico de estruturas finas e detalhadas.

PALAVRAS-CHAVE

Rugosidade, cavidades moldantes, fluidez, bio mimética.

ABSTRACT

This dissertation has as main purpose the analysis and optimization of the casting process for thin structures - metal foams. From bio mimetic analysis inspired by the development of the constituent elements of nature is intended to develop concepts and apply these same principles in the manufacturing technology area. The effect it may have, rough structures on the behavior of fluid flow, as well as the optimization of their morphology, is the subject of this study.

Aims to study and understand the effect that the rough surfaces of the cavities molding can be in the process of heat transfer and consequently in its fluidity. The process of lost wax casting is suitable for this type of structures, it is endowed with good quality and geometric dimensional. Some practical tests are performed in order to analyze the respective stages of filling and solidification rates during filling and solidification of the metal. These experimental complement different levels of roughness, to better understand the influence of this factor. Using as a casting alloys respectively the aluminum (Al) and bronze (CuSn) subjecting the fluid to always ideal conditions of pressure and vacuum. Also featured are some studies related to heat transfer and theoretical foundations that should be mentioned so that you can acquire a greater sensitivity in tackling this project.

In the end it is intended to determine whether the roughness can influence, directly or indirectly such casting, in order to optimize the manufacturing process of fine structures and detailed.

KEYWORDS

Roughness, molding cavities, fluidity, bio mimetic.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Palavras-Chave	iii
Abstract.....	v
Keywords	v
Índice de conteúdos.....	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
I - Prólogo	1
1. Introdução.....	2
2. Estímulo motivacional.....	5
II –Estado de arte	7
3. Fundamentos teóricos	8
3.1. Fundição	8
3.1.1. Os materiais e o seu fabrico.....	9
3.1.2. Processo de obtenção.....	13
3.1.3. Fluidez	15
3.1.4. Solidificação	16
3.2. Mecânica dos fluidos	18
3.2.1. Escoamento turbulento	19
3.2.2. Escoamento laminar	20
3.3. Princípios de Transferência de calor.....	20
3.3.1. Condução.....	22
3.3.2. Convecção.....	23
3.3.3. Radiação	23
3.4. Rugosidade e acabamento superficial.....	24
3.4.1. Critérios de rugosidade	28
3.4.2. Medição de rugosidade.....	29
4. Bio mimética aplicada a estruturas finas	31

5. Efeito da rugosidade na transferência de calor e fluidez.....	34
6. Caracterização das ligas	36
6.1. Liga A356.....	36
6.1.1. Propriedades físicas.....	36
6.1.2. Diagrama Al-Si-MG	37
6.1.3. Composição química	37
6.1.4. Propriedades mecânicas	38
6.1.5. Solidificação	39
6.2. Liga CuSn.....	40
6.2.1. Propriedades físicas.....	40
6.2.2. Diagrama fases Cu-Sn.....	40
6.2.3. Composição química	41
6.2.4. Propriedades mecânicas	41
6.2.5. Solidificação	42
7. Estudos analisados	43
7.1. Estudo da influência das superfícies rugosas na transferência de calor.	43
7.2. Rugosidade das superfícies no vazamento, utilizando moldação em gesso.....	47
7.3. Efeito da rugosidade superficial na transferência de calor no contacto entre duas partículas	50
III – Componente da Atividade experimental	53
8. Introdução experimental	54
8.1. Preparação das amostras	55
8.1.1. Modelo experimental.....	55
8.1.2. Tratamento de superfícies.....	56
8.2. Processamento experimental	58
8.2.1. Molde de cera.....	59
8.2.2. Moldação.....	60
8.2.3. Material	64
8.2.4. Vazamento.....	64
8.2.5. Desmoldação.....	66

8.3. Pós-processamento e Análise de resultados	67
8.3.1. Liga de alumínio	68
8.3.2. Liga de Cobre estanho	76
8.3.3. Discussão	85
V – Conclusões e trabalhos futuros	87
9. Conclusões.....	88
10. Desenvolvimentos futuros	91
11. Referências	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura celular de alumínio obtida através do vazamento em moldação cerâmica.	2
Figura 2 – Tecido speedo	3
Figura 3 – Princípio da pele de tubarão utilizada na raquete de ténis da Dunlop.	3
Figura 4- Superfície hidrofóbica inspirada na flor de lótus.	3
Figura 5 – Classificação dos processos de fundição (adaptado [3]).....	10
Figura 6 – Vazamento de uma barbotina cerâmica num chassis contendo um cacho de cera (adaptado [3]).....	13
Figura 7 – Vazamento de moldações cerâmicas em carapaça (adaptado [4]).	14
Figura 8 – Curva ideal de solidificação (adaptado [5]).	17
Figura 9 – Esquema da estrutura de solidificação de um lingote, corte vertical (adaptado [5]).....	18
Figura 10 – Escoamentos internos em tubagens. a) Escoamento laminar; b) Escoamento de transição; c) Escoamento turbulento; (adaptado [6]).	19
Figura 11 – Perfil de velocidades no caso de um escoamento turbulento (adaptado [6]).	19
Figura 12 – Perfil de velocidades no caso de um escoamento laminar (adaptado [6]).	20
Figura 13 – Ilustração de avaliação do estado das superfícies. a) Superfície geométrica; b) Superfície real; c) Superfície efetiva (adaptado [10]).	26
Figura 14 – Avaliação dos tipos de perfis de forma a definir a avaliação do estado de superfície. a) Perfil geométrico; b) Perfil real; (adaptado [10]).	26
Figura 15 – Perfil de rugosidade obtido a partir do perfil efetivo (adaptado [10]).	27
Figura 16 – Elementos que fazem parte da composição de uma superfície (adaptado [10]).....	27
Figura 17 – Critérios de avaliação da rugosidade, avaliação do comprimento cut-off (adaptado [10]).	28
Figura 18 – Critérios de avaliação da rugosidade, avaliação da rugosidade e ondulação (adaptado [10]).	28
Figura 19 – Envolvente do perfil de rugosidade, linha média (adaptado [10]).....	29
Figura 20 – Rugosímetro pertencente ao gabinete de metrologia da Universidade do Minho.	30
Figura 21 – Vista microscópica de superfícies hidrofóbicas existentes na natureza. a) Flor de lótus; b) Folha de um arbusto; c) Hemíptero conhecido como alfaiate; d) Casca de uma árvore; (adaptado [11])	31
Figura 22 – Superfícies que repelem a gota de fluido. a) Modelo de Wenzel; b) Modelo de Cassie-Baxter; c) Modelo combinado;	33

Figura 23 – Esboço de uma ideia do comportamento do fluxo através de uma parede rugosa (adaptado [12]).....	34
Figura 24 – Comportamento do fluxo de escoamento através de uma superfície rugosa (adaptado [12]).	35
Figura 25 – Composição química das ligas hipoeutéticas, eutéticas e hipereutéticas (adaptado [14]).	36
Figura 26 – Diagrama de fases da liga de alumínio A356 (adaptado [15]).	37
Figura 27 – Linha de arrefecimento para uma liga eutética (adaptado [15]).	39
Figura 28 – Diagrama de fases da liga binária CuSn (adaptado [15]).	40
Figura 29 – Caixa de teste com uma amostra no seu interior (adaptado [16]).	44
Figura 30 – Amostras de teste: Normal, SP120, SP240, SP400, SP600, respetivamente (adaptado [16]).	44
Figura 31 – Placa eletrónica de aquisição de dados da temperatura no interior da caixa (adaptado [16]).	45
Figura 32 – Gráfico da evolução da temperatura para cada amostra (adaptado [16]).	46
Figura 33 – Gráfico da diferença de temperatura registada para cada amostra testada (adaptado [16]).	46
Figura 34 – Tratamento térmico efetuado na moldação em gesso, (adaptado [17]).	47
Figura 35 – Princípio do esquema experimental estático da transferência de calor entre as duas esferas (adaptado [18]).	50
Figura 36 – Gráfico do calor transferido entre o contacto das partículas em relação á sua rugosidade superficial (adaptado [18]).	51
Figura 37 – Exemplificação da geometria das amostras que compõem a atividade experimental.....	55
Figura 38 – Prensa hidráulica.....	56
Figura 39 – Substratos de superfícies abrasivas, lixas.	56
Figura 40 – Equipamento de jateamento em areia.	57
Figura 41 – Árvore de cera construída com diferentes disposições das amostras.....	59
Figura 42 – Construção da estrutura da moldação, contém a árvore de cera e o chassis.	60
Figura 43 – Preparação do gesso de paris para posteriormente ser introduzido na estrutura da moldação.	61
Figura 44 – Equipamento responsável por garantir o vácuo e pressurização do gesso.	62
Figura 45 – Gesso de paris a ser introduzido na estrutura de moldação.	62

Figura 46 – Forno de alta resistência mais conhecido como mufla.	62
Figura 47 – Ciclo térmico da moldação com os seus respetivos estágios, realizado na mufla.	63
Figura 48 – Cadinho utilizado nas atividades experimentais e respetivas características, Indutherm VC-400.	65
Figura 49 – Ilustração de uma desmoldação de um fundido, efetuada num ensaio experimental.	67
Figura 50 – Fundido obtido no primeiro ensaio experimental da liga de alumínio.	69
Figura 51 – Gráfico da relação fluidez/rugosidade da primeira atividade experimental para a liga de alumínio.	70
Figura 52 - Fundido obtido no segundo ensaio experimental da liga de alumínio.	71
Figura 53 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da segunda atividade experimental para a liga de alumínio.	71
Figura 54 - Fundido obtido no terceiro ensaio experimental da liga de alumínio.	73
Figura 55 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da terceira atividade experimental para a liga de alumínio.	73
Figura 56 - Fundido obtido no quarto ensaio experimental da liga de alumínio.	75
Figura 57 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da quarta atividade experimental para a liga de alumínio.	75
Figura 58 - Fundido obtido no primeiro ensaio experimental da liga de cobre estanho.	77
Figura 59 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da primeira atividade experimental para a liga de cobre estanho.	78
Figura 60 - Fundido obtido no segundo ensaio experimental da liga de cobre estanho.	79
Figura 61 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da segunda atividade experimental para a liga de cobre estanho.	80
Figura 62 - Fundido obtido no terceiro ensaio experimental da liga de cobre estanho.	81
Figura 63 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da terceira atividade experimental para a liga de cobre e estanho.	82
Figura 64 - Fundido obtido no quarto ensaio experimental da liga de cobre estanho.	83
Figura 65 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da quarta atividade experimental para a liga de cobre estanho.	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Processos de fundição utilizados para diferentes tipos de liga (adaptado de [2]).	10
Tabela 2 – Ordens de grandeza dos defeitos geométricos do ponto de vista tecnológico (adaptado [9]).	25
Tabela 3 – Propriedades físicas da liga A356.	36
Tabela 4 – Composição química da liga A356.	37
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga A356.	38
Tabela 6 – Propriedades físicas da liga CuSn utilizada.	40
Tabela 7 – Composição química da liga binária CuSn.	41
Tabela 8 – Propriedades mecânicas da liga CuSn.	41
Tabela 9 - Registo da temperatura final e da diferença de temperatura registada para cada amostra tratada (adaptado [16]).	45
Tabela 10 – Materiais e parâmetros utilizados para as diferentes ligas, no processo experimental (adaptado [17]).	48
Tabela 11 – Resultados do vazamento experimental para o molde de gesso “Gold Star XI” (adaptado [17]).	48
Tabela 12 – Resultados do vazamento experimental para o molde de gesso “Prima Cast” (adaptado [17]).	49
Tabela 13 – Condições experimentais (adaptado [18]).	51
Tabela 14 – Breve resumo do procedimento experimental realizado para cada atividade experimental.	54
Tabela 15 – Granulação dos substratos utilizados para criarem rugosidade.	57
Tabela 16 – Especificação do tamanho de grão.	58
Tabela 17 – Quadro resumo das atividades realizadas ao longo do projeto.	66
Tabela 18 – Quadro resumo da atividade experimental dos ensaios realizados para a liga de alumínio.	68
Tabela 19 – Valores de rugosidade registados para o primeiro ensaio.	69
Tabela 20 – Valores de rugosidade registados para o segundo ensaio.	70
Tabela 21 - Valores de rugosidade registados para o terceiro ensaio.	72
Tabela 22 - Valores de rugosidade registados para o quarto ensaio.	74

Tabela 23 - Quadro resumo da atividade experimental dos ensaios realizados para a liga de cobre estanho.....	76
Tabela 24 – Valores de rugosidade registados para o primeiro ensaio.	77
Tabela 25 – Valores de rugosidade registados para o segundo ensaio.	79
Tabela 26 - Valores de rugosidade registados para o terceiro ensaio.....	81
Tabela 27 - Valores de rugosidade registados para o quarto ensaio.	83

I - PRÓLOGO

1. INTRODUÇÃO

O aumento do preço de ouro está a conduzir as empresas de joias a produzir componentes de baixo peso. Componentes estes que devem consistir numa camada externa e uma estrutura interna capaz de transmitir resistência mecânica ao componente. Esta área consiste num novo conceito de materiais onde uma estrutura é combinada com uma resistência estrutural elevada. Esta estrutura interna que também é conhecida como estruturas celulares metálicas têm sido alvo de diversos estudos e desenvolvimentos.



Figura 1 – Estrutura celular de alumínio obtida através do vazamento em moldação cerâmica.

A característica essencial da ideia é que os componentes de ouro, com este tipo de estrutura interna dedicada - Figura 1, sejam obtidos diretamente pelo vazamento. A tecnologia de fundição é o estado da arte atual da produção de joalheria. Para implementar esta abordagem de novo *design* são necessárias algumas mudanças no projeto atual, uma delas é desenvolver um modelo de fundição e controlar respetivamente o processo. A fluidez é um parâmetro importante necessário para obter estas estruturas. A fim de melhorar a superfície dos componentes a fluidez pode desempenhar um papel importante.

Estudos recentes têm vindo a demonstrar que a arrastar o fluxo de fluido, evitando o contacto entre ambos os corpos, pode ser responsável por melhorar a fluidez [1]. No entanto, se for seguida uma abordagem bio-inspirada, acredita-se que melhorias adicionais podem ser obtidas. Alguns exemplos onde o atrito superficial é reduzido têm sido desenvolvidos e aplicados em diferentes campos. Por exemplo, a Figura 2 mostra um tecido com propriedades auto secativas, conhecido como Fastskin onde a superfície tenta imitar a pele de tubarão. Um detalhe na respetiva figura mostra que a superfície é formada por uma estrutura de micro-formas em V, permitindo um contacto reduzido entre a água e de tecido e, portanto, reduzir assim o coeficiente de atrito entre os dois.

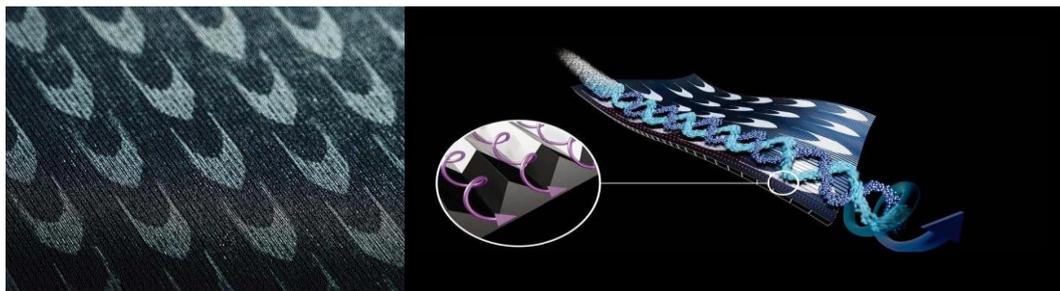


Figura 2 – Tecido speedo [2]

Outra abordagem bio inspirada interessante, está também relacionada com a pele de tubarão, e é utilizada em raquetes de ténis. A raquete Dunlop Biomimetic™ utiliza a tecnologia Aeroskin® que supostamente reduz o coeficiente de atrito entre a raquete e o ar em cerca de 25%. Pode ser visto na Figura 3, que a superfície da raquete tem algumas formas esféricas.



Figura 3 – Princípio da pele de tubarão utilizada na raquete de ténis da Dunlop. [1]

Outro exemplo interessante é encontrado na natureza da superfície hidrofóbica, conhecido como o efeito de flor de lótus Figura 4, esta permite que as folhas permaneçam quase secas. Repelindo a água que está em contato direto com esta planta. Os picos de nano-superfícies não permitem o contacto entre a água e a folha.



Figura 4- Superfície hidrofóbica inspirada na flor de lótus.

Em todas as situações anteriores, observa-se que o contacto entre os corpos é evitado. Este é o princípio que é desejado durante o vazamento ou enchimento do molde com metal. Tal como o princípio que é mencionado por *Nikuradse* [3], que durante o enchimento é de esperar que o metal não transfira calor á cavidade do molde. Se a transferência de calor ocorrer, o metal solidifica e reduzirá o enchimento do molde. Assim, ao utilizar os três efeitos naturais anteriores pode-se obter um enchimento do molde melhorado e o mesmo acontece na capacidade de encher estruturas mais finas, uma vez que é desejado para a abordagem de componentes novos.

Além disso, quando o molde é enchido com o metal, é desejável que o calor seja transferido do metal fundido para as paredes do molde, a fim de dar origem a uma microestrutura refinada. Microestruturas refinadas têm melhores propriedades mecânicas, também necessárias na conceção de componentes novos. E de novo, em todas as situações anteriores, a área de superfície aumenta, em comparação com superfícies completamente lisas, aumentando assim a transferência de calor do metal para o molde. Esta área de superfície aumenta somente se existir um contacto total entre o metal e a superfície do molde. Este contacto parece ser possível, devido aos processos de fundição que, após o enchimento do molde introduzem uma sobrepressão no metal fundido e aplicação de vácuo na câmara do molde. Assim, parece que as abordagens anteriores podem trazer vantagens substanciais para os princípios de enchimento, pois tal é desejado para obter uma ideia de sucesso de uma nova abordagem de *design* de componentes.

No entanto, é necessário um estudo dos parâmetros das superfícies a fim de se compreender completamente o efeito das características da superfície na fluidez do metal. Quando o estudo estiver concluído a otimização dos parâmetros de superfície e as variáveis do processo devem ser realizadas. Se o estudo for bem-sucedido pode dar origem um projeto otimizado de componentes de superfícies e *design* microestrutural 3D para um conceito de novos materiais.

2. ESTÍMULO MOTIVACIONAL

Ciente da importância que este projeto tem no capítulo da formação pessoal e profissional, deparo-me com um estudo de natureza científica que permite desenvolver competências transversais em diversas áreas da engenharia mecânica. Sabe-se, através dos princípios básicos da tribologia, que para conseguirmos escoar duas determinada superfícies em contacto é necessário recorrer a utilização de um fluido de características lubrificantes. Isto é um princípio bastante utilizado ao longo da evolução mecânica mas nem sempre aplicável a todas as áreas. Incluído o capítulo da fundição, não é possível recorrer às propriedades de um fluido para criar um determinado tipo de escoamento que seja favorável à sua taxa de solidificação. Assim surge a necessidade de realizar um estudo com base numa possível alternativa a este fenómeno. Alternativa que é posta em prática e analisada na vanguarda da evolução de novas ideias à tecnologia de fundição de peças finas.

Sabendo das dificuldades que são encontradas na abertura de novos caminhos não é pretendida a obtenção perfeccionista ao ponto de deixar ou criar um conceito novo. Pretende-se sim explorar todas as potencialidades que surgem numa nova ideia, aproveitando sempre aprender e compreender todos os conceitos abordados de forma a que estes contribuam positivamente para o desenvolvimento científico e pessoal.

II –ESTADO DE ARTE

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para se conseguir entender como se relacionam os diversos conceitos envolvidos neste projeto opta-se por realizar uma pequena introdução dos objetos principais do estudo. Desta forma faz-se uma abordagem sobre os princípios da fundição nomeadamente na fundição de componentes finos, um levantamento sobre os conceitos existentes sobre o comportamento que um fluido tem bem como a transferência de calor que ocorre em torno do mesmo. Chegando ao ponto de os interrelacionar com a matéria introdutória da rugosidade.

3.1. Fundição

Na obtenção de componentes mecânicos metálicos, com as características físicas adequadas às funções que vão desempenhar, com um custo aceitável e com a capacidade de melhoramento da sua qualidade é necessário adquirir um conhecimento atualizado quer ao nível tecnológico bem como ao nível cinemático. Pois tratando-se de uma peça obtida através da tecnologia da fundição é necessário ter em atenção não só as propriedades físicas exigidas mas também a sua forma geométrica, de maneira a que seja garantida uma excelente capacidade de resposta às solicitações aplicadas.

Sabe-se que esta tecnologia, a fundição, é talvez o processo de conformação de metais que permite uma elevada variabilidade de formas e geometrias passíveis de se obterem. A sua vantagem reside principalmente na otimização do fator económico entre a matéria-prima e a forma de como se obtém o componente, ou seja o seu processo. Dentro desta grande tecnologia existem múltiplos parâmetros que devem/podem ser ajustados de acordo com os mais variados ramos da ciência. É desta forma que surge a necessidade de afinar este processo de forma a colmatar, de forma eficiente, a variabilidade encontrada na produção de componentes de baixa espessura.

Assim quando os resultados obtidos são transpostos para a escala industrial devem possibilitar um aperfeiçoamento na qualidade das peças fundidas, acrescentando um valor extra ao tipo de tecnologia em desenvolvimento, a fundição, perante tecnologias concorrentes como o forjamento, a estampagem ou até mesmo a soldadura. Desta forma as previsões continuam a confirmar-se pois esta tecnologia caracteriza-se como um dos mais versáteis processos tecnológicos de fabrico.

“A tecnologia de fundição é composta por métodos, processos e técnicas para a conformação de metais fundidos, e para a solidificação controlada.” [4]

O seu principal objetivo é conferir ao metal a sua forma desejada, vertendo o metal (fundido) dentro de uma cavidade feita no interior da moldação, depois de concluída a solidificação se consiga obter a peça moldada. Este é o princípio clássico que Arquimedes proferiu:

“o líquido toma a forma do vaso que o contém” [4]

O objetivo deste processo é obter componentes de acordo com os requisitos pré-estabelecidos na fase de projeto. Requisitos estes que são podem descritos quanto à forma, às dimensões, ao acabamento e à tolerância. Quando a qualidade superficial ou as propriedades intrínsecas das peças fundidas não são suficientes para corresponder a tais requisitos do projeto, é necessário recorrer a outras tecnologias de conformação. Exemplos destes fatores são o acabamento ou o tratamento térmico posterior. O acabamento superficial é normalmente obtido com recurso a ferramentas de arranque de aparas ou forjamento enquanto as propriedades intrínsecas correspondem aos aspetos metalúrgicos conferidos através de tratamentos térmicos.

3.1.1. OS MATERIAIS E O SEU FABRICO

Para se classificar os processos de fundição deve-se ter em consideração a natureza dos materiais utilizados para o fabrico, ou seja, para a obtenção de uma única peça vazada ela é considerada como “perdida”. No caso de uma moldação que permite vaziar uma serie de peças, sem serem alteradas as características do molde, esta pode ser classificada como uma moldação permanente. Assim temos dois tipos de classificação do processo, através da moldação perdida ou então com recurso à moldação permanente. O processo normal de fundição deve seguir uma ordem categorizada pelo projeto do componente a vaziar, as ferramentas necessárias e pelo tipo de processo a selecionar.

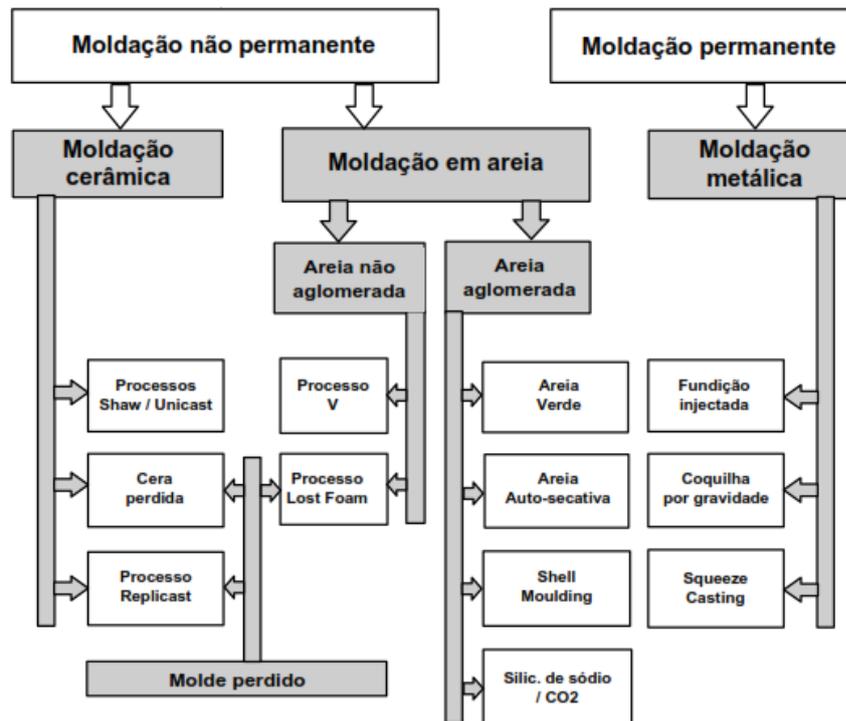


Figura 5 – Classificação dos processos de fundição (adaptado [5]).

A indústria de fundição tem sofrido uma crescente evolução no sentido de especificar cada tipo de produção, de acordo com o tipo de liga a vaziar. Resumidamente existem essencialmente dois tipos de liga que se utilizam na produção de componentes vazados, as ligas ferrosas e as ligas não ferrosas, estas está apresentadas no quadro seguinte:

Tabela 1 – Processos de fundição utilizados para diferentes tipos de liga (adaptado de [4]).

Tipo de Liga	Designação	Processo de fundição
Ferros fundidos	Ferro fundido cinzento (grafite lamelar)	Moldações em areia.
	Ferro fundido nodular (Grafite esferoidal)	
	Ferro fundido maleável	
	Ferro fundido branco	
	Ferro fundido mesclado	
	Ferro fundido de grafite vermicular	
	Ferro fundido austemperado	
Ferros ligados		
	Aços ao Carbono correntes	Moldações em areia

	<p>Aços de baixa liga</p> <p>Aços de alta liga</p> <p>Aços ligados resistentes ao calor</p> <p>Aços ligados resistentes ao desgaste</p> <p>Aços ligados resistentes ao ataque químico</p>	<p>Moldações com modelos perdidos</p> <p>Moldações cerâmicas</p>
Alumínio	Ligas alumínio	<p>Moldações em areia</p> <p>Moldações com modelos perdidos</p> <p>Moldações permanentes metálicas por injeção</p>
Cobre	<p>Latão</p> <p>Bronze duro de canhão</p> <p>Bronze Alumínio</p> <p>Bronze Silicioso</p> <p>Cupro Crómio</p> <p>Cupro Berílio</p>	<p>Moldações em areia</p> <p>Moldações permanentes metálicas</p>
Magnésio	Ligas de Magnésio	Moldações em areia
Zinco	Ligas de zinco	Moldações em areia
Super-Ligas	<p>Ligas de Níquel</p> <p>Ligas de Cobalto</p>	Moldações com modelos perdidos

O sector da indústria de metais ferrosos vazados é o maior, quer em termos de cadência anual quer no número de fundições que trabalham com este tipo de ligas. Os processos de fusão e de elaboração metalúrgica dos aços são bastante diferentes da dos ferros fundidos, por isso a maioria especializam-se num dos dois principais grupos. No que concerne aos metais ferrosos, as fundições estão em grande número como no caso das indústrias de fabrico de componentes para o sector automóvel.

Os processos de moldação de areia predominam, em termos de metais ferrosos, sendo que a areia verde é o tipo de moldação mais utilizada. As areias auto-secativas têm tido uma enorme progressão nos últimos anos, pois são caracterizadas por consistirem num processo maioritariamente realizado a frio. O tamanho das peças a produzir é também um fator que está ligado ao facto das indústrias optarem por uma especialização neste ramo, ao invés da produção de grandes series, consiste num conjunto de operações bem mais elaboradas e específicas.

Um dos fatores que influenciam a precisão das peças de fundição é sem dúvida a rugosidade e a ondulação superficial do componente vazado, pelo que um bom acabamento de superfície é posteriormente necessário. Isto porque se espera um componente com uma boa precisão dimensional, em que as dimensões da peça sejam o mais próximo do projeto da peça.

O aumento de precisão das peças de fundição, nem sempre é um fator de aumento do custo do produto, ou seja um componente que contenha estas características pode vir a dispensar as consequentes operações de mecânicas de acabamento superficial reduzindo assim os custos e os tempos de operação envolvidos. É evidente que quanto maior a precisão dimensional que se pretenda obter maior também será o número de tecnologias avançadas e consequentemente de equipamentos e meios laboratoriais de controlo mais eficientes e precisos. As peças vazadas cujas formas geométricas tenham dimensões perto das dimensões nominais de projeto necessitam de menores sobre espessuras para maquinaria e portanto tempos de acabamento são menores, o que representa uma redução de custos dos materiais abrasivos e energias de produção.

Ao longo deste assunto, a fundição, percebe-se que é uma tecnologia que contém processos de conformação de peças metálicas com a capacidade de dar forma final às peças mecânicas no mais curto espaço de tempo e a custos mais baixos. Assim com o contínuo desenvolvimento dos processos tecnológicos os componentes fundidos são cada vez mais produzidos com as dimensões finais requeridas contribuindo para o conceito de peças fundidas vazadas com uma forma final nítida.

3.1.2. PROCESSO DE OBTENÇÃO

Dentro da fundição existem variadíssimos métodos de obtenção de peças vazadas. No decorrer deste trabalho apenas se pretende dar ênfase a todos os elementos que estejam diretamente relacionados. Assim sendo começa-se por estudar e detalhar o principal processo de fundição utilizado, fundição com moldações em gesso. O processo de moldação com gesso é um processo de fundição especializado para a produção de peças vazadas em ligas metálicas não ferrosas com superfícies lisas, de detalhes finos e de maior rigor dimensional do que aquele que pode ser obtido por moldações de areia. Este processo é conhecido como o vazamento em material cerâmico e é processado conforme a imagem apresentada a seguir, Figura 6.

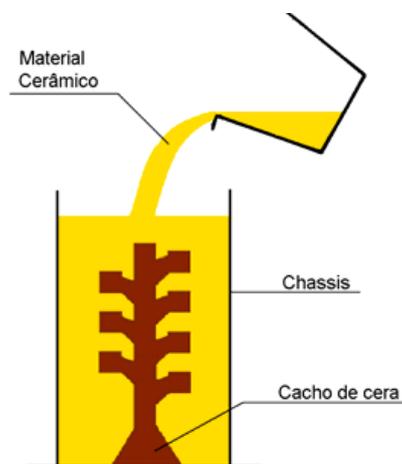


Figura 6 – Vazamento de uma barbotina cerâmica num chassis contendo um cacho de cera (adaptado [5]).

O material mais utilizado neste processo é o gesso (material cerâmico), no entanto outros materiais podem ser utilizados juntamente com a água, dependendo das características requeridas. O gesso utilizado neste processo pode apresentar diferentes percentagens de hidratação formando-se as três composições químicas seguintes:

Di-hidrato de Sulfato de Cálcio	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Hemi-hidrato de Sulfato de Cálcio	$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$
Sulfato de Cálcio anidro	$CaSO_4$

Na conceção das moldações deve-se aplicar vibração para acomodar o gesso aos detalhes dos moldes e para libertar eventuais bolhas existentes. O tempo de manuseamento do material varia entre 10 a 20 minutos. A extração deve ser feita com muito cuidado de forma a preservar os detalhes

geométricos. Estas moldações devem ser introduzidas numa mufla com temperaturas a rondar os 200 e 260°C com circulação de ar para secagem mais rápida e conseguir melhor resistência física.

Na mufla não se deve ultrapassar os 380°C de forma a não permitir uma transformação alotrópica associada com variação de volume do gesso. As moldações devem estar cheias em condições de vácuo ou de baixa pressão (normalmente 1 bar) assegurando assim um enchimento completo das espessuras finas da peça. O processo de vazamento é efetuado através da inserção do material fundido para interior da moldação cerâmica tal como se pode observar na Figura 7.



Figura 7 – Vazamento de moldações cerâmicas em carapaça (adaptado [6]).

O processo é normalmente utilizado para as ligas de alumínio. Embora que algumas pelas possam ser vazadas em ligas de Magnésio e Zinco. As ligas de Cobre podem também ser utilizadas com este processo, tendo em conta sempre as temperaturas de vazamento e de moldação. O valor mássico máximo que normalmente se utiliza neste processo é de 50kg. Relativamente aos volumes de produção e respetivos tempos de operação, embora sejam requeridos modelos de precisão, estes não são elevados comparativamente a outros processos. É indicado essencialmente para pequenas produções embora possa ser aplicado a reprodução de equipamentos totalmente automáticos.

Podem ser obtidas secções mínimas com espessuras na ordem dos 0.25mm. normalmente as secções mais vazadas estão na gama dos 1.5mm para as ligas de Zinco, 1.75mm para as ligas de Alumínio e 2.25mm no caso do Cobre [4].

O problema da produção de peças com espessuras reduzidas reside na capacidade de vazabilidade da liga. Quanto menores forem as espessuras atribuídas maiores serão as dificuldades de enchimento das peças antes da solidificação. Pode definir-se como uma espessura crítica, a espessura

abaixo da qual não é possível garantir o total enchimento das cavidades da moldação com essas dimensões mínimas.

É um processo que permite obter um bom detalhe de forma geométrica, devido à boa fluidez do material e da moldação. Permite também um bom acabamento superficial, das peças vazadas em ligas de médio ponto de fusão, valores entre os $0. \mu m$ e $1.5 \mu m$.

3.1.3. FLUIDEZ

Para que operação de fundição seja bem elaborada, é necessário que o fluxo de metal líquido durante o vazamento, antes da solidificação, apresente um conjunto de propriedades de forma a preencher todas as cavidades da moldação e todos os espaços disponíveis que surgem durante a solidificação. Para se controlar este fator importantíssimo deve-se controlar a capacidade que o metal líquido tem em se deixar fluir pelos canais de enchimento, a fluidez ou também conhecido como vazabilidade. O fluxo de metal depende da viscosidade, da convecção do metal líquido e do modo de solidificação do metal nos canais. Sabe-se que no caso de ligas metálicas, a solidificação pode iniciar-se pela formação de dendrites nas paredes dos canais, em que o fluxo sofre uma redução à medida que estas crescem, fazendo com que diminua a secção dos canais. No caso de metais puros ou ligas eutécticas, o metal flui com maior facilidade, pois existe a tendência para a solidificação homogênea no seio do metal líquido, formando-se núcleos de solidificação na frente do fluxo [4].

O termo vazabilidade (ou fluidez) é utilizado para descrever o comportamento macroscópico do metal líquido durante o vazamento no interior da moldação, ou durante o escoamento pelas passagens internas dos canais. A vazabilidade pode ser quantificada pelo cálculo dos parâmetros que a influenciam e é expressa em termos de uma distância L percorrida pelo metal ao longo de um canal até percorrer o seu fluxo por solidificação.

A equação da vazabilidade é obtida ao considerar-se a transferência de calor das paredes à entrada do canal, supondo que o fluxo termina quando o metal solidifica totalmente. Considerando que a transferência de calor é controlada pela interface metal/moldação, a quantidade de calor removida de uma pequena zona de comprimento δL , na entrada do canal, num tempo t necessário para que o fluxo termine é dado por:

$$q = k_{int}(T_f - T_0)2\pi.r.\delta L.t$$

Considerando que esta quantidade de calor removida pela moldação deve ser igual à quantidade de calor cedida pelo material para que a solidificação seja completada, ou seja:

$$q' = p(C_l + C_e \cdot \Delta T)\pi \cdot r^2 \cdot \delta L$$

Igualando estas duas equações e considerando $t = \frac{l}{v}$, obtém-se:

$$L = \frac{p \cdot r \cdot v \cdot (C_l + C_e \cdot \Delta T)}{2k_{int} \cdot (T_f - T_0)}$$

p - Massa específica do metal,

r - Raio do canal,

v - Velocidade do fluxo ($v = \sqrt{2g \cdot h}$),

C_l - Calor latente de solidificação,

C_e - Calor latente específico do metal,

ΔT - Sobreaquecimento de vazamento,

k_{int} - Coeficiente de transmissão de calor na interface do metal/moldação,

T_f - Temperatura de fusão (ou solidificação),

T_0 - Temperatura inicial da moldação.

Esta equação é válida para os processos de solidificação das ligas correntes em que se formam dendrites a partir das paredes do canal obstruindo-o na zona inicial do fluxo, reduzindo progressivamente o raio do canal na entrada do fluxo. No entanto no caso dos metais puros e nas ligas eutéticas, que solidificam preferencialmente por nucleação no seio do metal líquido, o fluxo só pode ser paralisado pela maior viscosidade do líquido e pelo bloqueio de fragmentos sólidos à frente da corrente de metal líquido.

3.1.4. SOLIDIFICAÇÃO

Embora existam várias técnicas de obtenção de metais em estado sólido, a fusão de materiais seguida de solidificação é sem dúvida o processo mais utilizado. Este fenómeno, a solidificação, requer bastante atenção na metalurgia, pois no caso dos metais ocorre normalmente uma cristalização. Porque dificilmente se obtém materiais no estado amorfo ou vítreo [7].

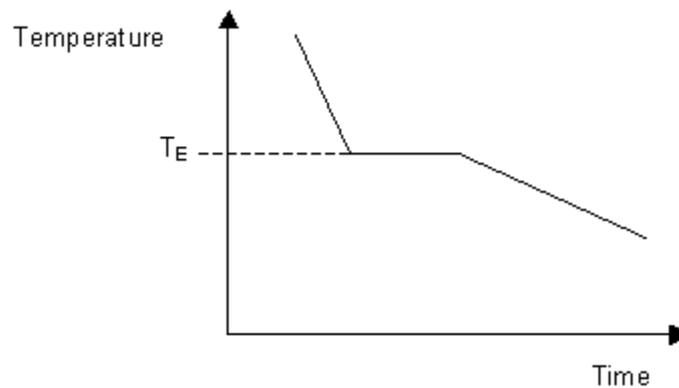


Figura 8 – Curva ideal de solidificação (adaptado [7]).

A tendência do material é passar logo à temperatura de solidificação de arranjo atômico desordenado. Esta mudança de temperatura ocorre em valores ligeiramente abaixo da temperatura de equilíbrio sólido-líquido, T_E . O calor latente de fusão é transformado em energia térmica e eleva a temperatura em direção ao valor de equilíbrio, tornando o processo de solidificação descontínuo. Para que este ocorra progressivamente é necessário que a temperatura da relação sólido/líquido seja inferior ao valor de T_E , através da remoção de calor por condução. Assim a velocidade de solidificação é controlada através da taxa de extração do calor latente assim a velocidade de cristalização depende da velocidade de arrefecimento.

Pela imagem acima apresentada percebe-se que a curva ideal de solidificação é quando a temperatura sólida é a mesma da líquida e ocorre para o valor T_E . É nesta fase que ocorre uma mudança de estado e permite obter o metal no estado sólido.

O mecanismo de solidificação descrito permite obter peças vazadas e ocorrem ainda heterogeneidades que vão influenciar as características físicas do metal. As peças vazadas apresentam uma grande variedade de estruturas, mas normalmente esta ocorre em duas principais fases, de acordo com a imagem abaixo apresentada.

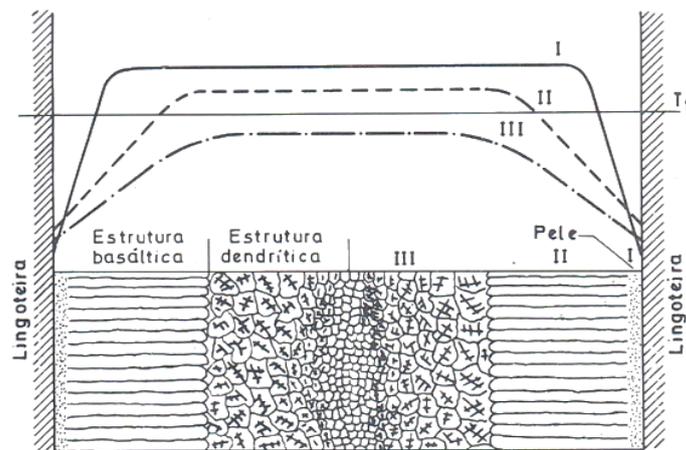


Figura 9 – Esquema da estrutura de solidificação de um lingote, corte vertical (adaptado [7]).

Zona I – esta zona contém baixa espessura e corresponde à chamada pele, formada por cristais muito pequenos. Na realidade ocorre um arrefecimento brusco quando o metal entra em contacto com a parede da moldação. Estes cristais são equiaxiais e sem orientação preferencial.

Zona II – corresponde à zona basáltica ou colunar. Aqui a velocidade de arrefecimento diminui entre o líquido e a moldação. Os cristais crescem então para o interior segundo uma orientação privilegiada, perpendicularmente à parede de moldação, dando lugar a cristais longos, colunares na direção do fluxo calorífico.

3.2. Mecânica dos fluidos

Entende-se por fluido como sendo uma substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento, não importando o tamanho dessa tensão. Tal força de cisalhamento é uma componente tangencial da força que age sobre a superfície. Outros materiais, não fluidos, não satisfazem a definição de fluido. Uma substância plástica sofre uma certa deformação proporcional à força, mas não continuamente quando a tensão aplicada for inferior à sua tensão de escoamento [8].

Os fluidos podem ser classificados como sendo ou não Newtonianos. No fluido Newtoniano existe uma relação linear entre o valor de tensão de cisalhamento e a velocidade de deformação resultante. No caso de o fluido não ser Newtoniano, existe uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a velocidade de deformação angular. Gases e líquidos finos tendem a ser fluidos não Newtonianos, enquanto que hidrocarbonetos de longas cadeias podem ser não Newtonianos. Considera-se como sendo um fluido ideal, aquele que esteja isento de atrito e não seja compressível.

De todas as propriedades dos fluidos, a viscosidade é sem dúvida a que requer maior preocupação no estudo de escoamentos. Esta é a propriedade que o fluido tem em oferecer resistência ao cisalhamento. A lei de Newton estabelece que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à viscosidade. A viscosidade de um gás é contrária a um fluido, pois aumenta com a temperatura. Esta viscosidade é frequentemente chamada de viscosidade absoluta ou dinâmica.

A estática dos fluidos é praticamente uma ciência exata. No entanto a natureza do escoamento de um fluido real é bem mais complexa. Pois os escoamentos podem ser de diversas formas, normalmente conhecidos como sendo turbulentos ou laminares. A figura abaixo apresentada, Figura 10, apresenta um aspeto visual de como estes escoamentos tendem a apresentar no interior de tubagens.

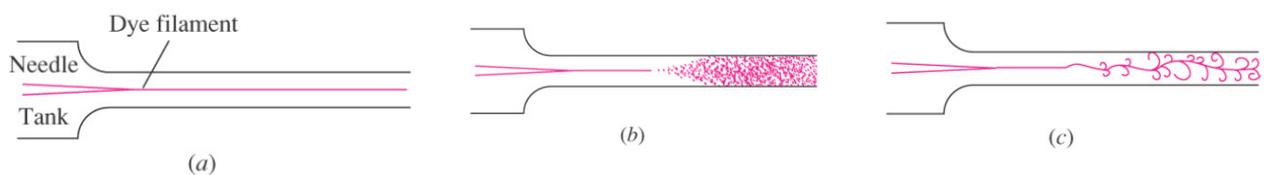


Figura 10 – Escoamentos internos em tubagens. a) Escoamento laminar; b) Escoamento de transição; c) Escoamento turbulento; (adaptado [8]).

3.2.1. ESCOAMENTO TURBULENTO

Os escoamentos turbulentos são os mais frequentes, na prática da engenharia. Nestes as partículas do fluido movem-se em trajetórias irregulares, provocando uma transferência de quantidade de movimento de uma parte do fluido para a outra. Este tipo de fluido gera maiores tensões de cisalhamento causando assim maiores irreversibilidades ou perdas. Associado a este fenómeno estão os maiores caudais movimentados, pois interferem diretamente no perfil de velocidades do escoamento.

Num escoamento plenamente desenvolvido, o perfil de velocidades na secção transversal tem uma característica relevante, conforme se vê na Figura 11.

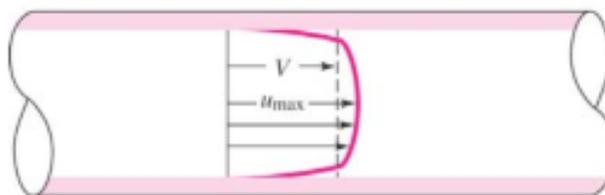


Figura 11 – Perfil de velocidades no caso de um escoamento turbulento (adaptado [8]).

Percebe-se facilmente que neste escoamento o perfil de velocidades apresentado indica que a velocidade do fluido no interior do escoamento tem valores substancialmente diferentes o que permite dizer que junto das paredes da secção o escoamento ocorre de uma forma mais lenta do que no seu centro.

3.2.2. ESCOAMENTO LAMINAR

No caso do escoamento laminar, as partículas movem-se ao longo da trajetória de forma suave em lâminas ou camadas, deslizando suavemente sobre a superfície. Este tipo de escoamento é comandado pela lei de Newton da viscosidade, que relaciona tensões de cisalhamento com a taxa de deformação angular. Pois na presença deste escoamento, a viscosidade amortece a tendência para o aparecimento de turbulências. Quando se apresentam as combinações dos fatores de baixa viscosidade e alta velocidade este regime de escoamento passa a ser turbulento.

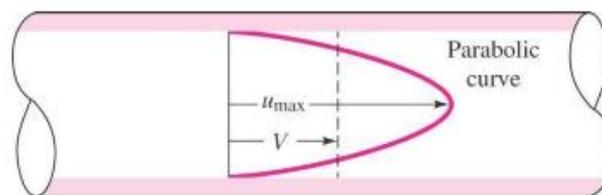


Figura 12 – Perfil de velocidades no caso de um escoamento laminar (adaptado [8]).

Este escoamento ocorre no regime laminar, onde existe um mínimo de agitação das várias camadas do fluido. As diferentes secções de escoamento deslocam-se em planos paralelos sem que ocorra a sua mistura.

3.3. Princípios de Transferência de calor

Transferência de calor é uma ciência que estuda as modificações de energia entre diferentes corpos materiais ocorridas devido a variações de temperatura. Baseando-se nos princípios da termodinâmica, em que se sabe que a energia transferida é definida como calor. O objetivo principal desta ciência não é só explicar como esta energia pode ser transferida, mas sim avaliar as taxas em que esta interação ocorre em certas condições. Embora que o conceito de taxa de transferência de calor seja o principal objeto de estudo revela ainda a diferença entre transferência de calor e a termodinâmica. Pois a termodinâmica apenas estuda sistemas em equilíbrio, calculando a quantidade de energia necessária para que um sistema mude o seu estado de equilíbrio, desta forma não pode prever a velocidade que ocorre esta mudança de estado. Assim a transferência de calor suplementa o primeiro e o segundo

princípio da termodinâmica, fornecendo conceitos adicionais que servem de auxílio para estabelecer as taxas de transferência de calor [9].

Existem principalmente três formas de transferência de calor sendo elas a condução, a convecção e a radiação. Os seus mecanismos básicos de funcionamento são descritos em seguida. Primeiramente é necessário definir o conceito de condutividade térmica, pois assume essencialmente uma presença muito forte nos capítulos da transferência de calor.

Entende-se por condutividade térmica como o valor numérico que traduz a rapidez com que o calor é transferido num dado material. O mecanismo de condução térmica num gás é simples. A energia cinética de uma molécula é identificada com a sua temperatura, assim em zonas de temperaturas mais elevadas as moléculas tem maiores velocidades. Assim a condutividade térmica é sempre dependente da temperatura. Relativamente ao mecanismo físico de condutividade térmica em fluidos é qualitativamente a mesma dos gases. Esta energia térmica pode ser conduzida através de vibração e transporte dos elétrões livres.

Quando existe um gradiente de temperatura num corpo, estamos perante uma transferência de energia da região de alta temperatura para a região de baixa temperatura. Assim define-se que a energia é transferida por condução e que a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura.

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

O termo “calor” é definido pela primeira lei da termodinâmica, como a energia que é transportada na fronteira de um sistema termodinâmico devido à diferença de temperatura ocorrida entre esse mesmo sistema e a sua vizinhança. Assim a primeira lei pode ser dada por:

$$\Delta E = W + Q + E_M$$

O segundo membro da equação representa as três diferentes formas de energia que podem ser transportadas pela fronteira do sistema: Calor Q , trabalho W e energia E_M . O resultado desta troca de massa e energia é ΔE , conhecido como a transferência de calor. Aplicando a segunda lei da termodinâmica pode-se simplificar que o calor é sempre transferido no sentido de diminuir a temperatura. Esse calor transferido por unidade de tempo é referido como a taxa de transferência de calor e é dada por:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$

Em que o fluxo de calor é expresso como:

$$\dot{q} = \frac{dQ}{dA}$$

E descreve a transferência de calor por unidade de tempo e por unidade de área perpendicular ao fluxo de transferência de calor. No geral, existem três modos de transferência de calor.

3.3.1. CONDUÇÃO

Esta transferência de calor é devida à interação entre moléculas vizinhas animadas de movimentos aleatórios. Assim a condução de calor ocorre em sólidos, líquidos ou gases mas não exige nenhum movimento macroscópico ou algum fluxo das moléculas. Com o aumento da temperatura, a agitação das moléculas aumenta e por sua vez intensificam a sua energia cinética ao nível molecular. As colisões entre elas causam a transferência de energia proveniente daquelas que possuem maior energia cinética. No caso dos metais, a energia é transferida por elétrons livres, adicionalmente contribuem para aquecer por condução [10].

Felizmente não é necessário investigar como se comporta o movimento das moléculas para calcular a sua transferência de calor por condução. Basta simplesmente recorrer aos procedimentos de cálculo estabelecidos. Basta simplesmente saber uma propriedade do material em estudo, bem como um gradiente de temperatura. Considerando o gradiente de temperatura como $\partial t/\partial x$ e direção à coordenada x , o fluxo de calor \dot{q} depende exclusivamente da propriedade do material designado por condutividade, λ . A relação é dada por:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

A expressão que apresenta esta relação é conhecida como a lei de Fourier. Onde q é a taxa de transferência de calor e $\partial T/\partial x$ é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor. A constante k , é designada por condutividade térmica do material. A equação contém o sinal negativo para satisfazer o segundo princípio geral da termodinâmica, o calor deve fluir no sentido da temperatura decrescente. A condutividade térmica λ assume um valor tipicamente alto para sólidos seguindo de líquidos e gases.

$$0.015 \leq \lambda_{gas} \leq 0.15 \text{ (W/Km)}$$

$$0.01 \leq \lambda_{liquid} \leq 0.65 \text{ (W/Km)}$$

$$1 \leq \lambda_{solid} \leq 450 \text{ (W/Km)}$$

3.3.2. CONVECÇÃO

Este princípio refere-se ao modo de transporte do calor de um fluido que flui macroscopicamente. É uma sobreposição de transporte de calor condutivo no fluido e o transporte de energia devida ao movimento macroscópico, isto inclui o transporte de entalpia e de energia cinética. Desta forma, o fluxo de calor convectivo depende não só das propriedades do material como também das propriedades do processo, por exemplo a velocidade do fluido. Para descrever projetos em que seja necessário detalhar os processos técnicos a transferência de calor por convecção revela um interesse especial. Pois consegue-se obter um perfil de velocidades que descreve os gradientes de temperatura juntamente com os perfis de velocidade na direção paralela às paredes do canal [10].

O transporte de calor convectivo perpendicular à parede nesta camada limite é dirigida para temperaturas mais baixas, quando $T_F > T_W$ a parede é aquecida pelo fluido, mas se $T_F < T_W$ a parede é arrefecida pelo fluido. O fluxo de calor, q , depende da diferença de temperatura e dos perfis de velocidade na camada limite, o que pode ser muito complexo no caso de um caso não-estacionário.

O processo de transferência de calor por convecção está diretamente associada ao escoamento de um fluido sobre uma superfície livre (de um sólido ou líquido). O efeito global da convecção pode ser expresso através da lei de Newton do arrefecimento que traduz:

$$q = \alpha (T_W - T_F)$$

Aqui a taxa de transferência de calor é relacionada com a diferença de temperatura entre a parede e a área superficial do fluido. A quantidade α é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Para alguns casos é possível o seu cálculo analítico. Este coeficiente por vezes é também denominado por condutância de película, devido à sua relação com o processo de condução na fina camada do fluido estacionário junto à superfície da parede. Esta quantidade depende do fluido e das propriedades relevantes do processo, bem como configurações geométricas da parede ou rugosidade da superfície.

3.3.3. RADIAÇÃO

A energia emitida por qualquer matéria para a sua vizinhança em forma de ondas eletromagnéticas é designada por radiação. Ao contrário da condução e da convecção esta forma de transferência de calor não é limitada a qualquer meio de transporte pois as ondas eletromagnéticas podem viajar através de vácuo.

O mecanismo de radiação contrasta com os mecanismos anteriormente apresentados, a convecção e condução, onde a energia é transferida através do meio natural, o calor pode ser transferido

em regiões onde exista um vácuo perfeito [10]. Neste caso a radiação é propagada como resultado de uma diferença de temperatura, radiação térmica. Pelas considerações da termodinâmica sabe-se que um radiador ideal emite energia numa taxa proporcional à quarta potência de temperatura absoluta do corpo. Assim na troca de calor entre dois corpos tem-se:

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

Onde σ é a constante de proporcionalidade Stefan-Boltzmann. Assim se torna como a equação comumente conhecida pela equação de Stefan-Boltzmann da radiação térmica para corpos negros. Um corpo negro é um corpo que emite energia de acordo com a lei de T^2 . Tal corpo tem esta denominação pois são metais negros cobertos por fumo.

Depois de serem introduzidas estas observações do capítulo da transferência de calor, pode-se resumir de uma forma bastante simples. É sabido que este fenómeno pode ocorrer por um ou mais destes três mecanismos. O mecanismo físico da convecção está relacionado à condução através da convecção de um fluido na superfície do fluido. A lei de Fourier aplica-se tanto na condução como na convecção, embora a mecânica dos fluidos deva ser empregue nos problemas de convecção para estabelecer gradientes de temperatura.

A transferência de calor por radiação envolve um mecanismo físico diferente, a propagação eletromagnética da energia. Para tal transferência de energia introduz-se o conceito de radiador ideal que emite energia numa razão proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta.

3.4. Rugosidade e acabamento superficial

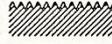
Entende-se por rugosidade superficial, também conhecida por rugosidade, como o termo técnico que permite descrever todas as superfícies que apresentem um conjunto de desvios ou irregularidades, caracterizados por pequenas saliências e reentrâncias presentes na superfície. Também pode ser conhecida pelo erro micro geométrico de uma superfície. Tem uma elevada importância para comportamentos de diversos componentes mecânicos, comportamentos esses que podem depender de:

- Qualidade de deslizamento (atrito);
- Resistência ao desgaste;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga;

- Vedação;
- Aspeto visual.

É quantificada pelos desvios verticais de uma superfície real relativamente à sua forma ideal. Se esses desvios são grandes, a superfície é rugosa, se elas forem pequenas então diz-se que a superfície é lisa. A rugosidade desempenha um papel importante na determinação de como um objeto real irá interagir com o seu ambiente. As superfícies ásperas (rugosas) geralmente têm um desgaste mais elevado pois têm maior coeficiente de atrito do que as superfícies lisas (pela descrição tribológica). Rugosidade é muitas vezes um fator nocivo da performance de um componente mecânico, uma vez que as irregularidades da superfície podem formar zonas de nucleação propícias para fissuras ou corrosão. Caracterizada também por estar maioritariamente associada a defeitos superficiais de componentes, a rugosidade pode ser classificada, do ponto de vista tecnológico, da seguinte forma:

Tabela 2 – Ordens de grandeza dos defeitos geométricos do ponto de vista tecnológico (adaptado [11]).

Tipo de defeito	Número de ordem	Designação	Esquema do perfil geométrico
Defeitos macro geométricos	1	Forma	
	2	Ondulação	
Defeitos micro geométricos	3	Rugosidade	
	4		
Somatório de defeitos	De 1 a 4	Superfície efectiva	

A rugosimetria é a técnica mais comum de análise da microgeometria das superfícies técnicas. Assim entende-se como imperativo, indicar a terminologia utilizada e os conceitos de superfície. Desta forma, pode-se diferenciar três conceitos de superfície:

- A superfície real que limita o corpo e o separa do meio ambiente.
- A superfície geométrica que é definida pelo desenho de fabricação sem considerar os defeitos geométricos da superfície.
- A superfície efetiva que é a imagem aproximada da superfície real resultante das apalpagens efetuadas sobre ela.

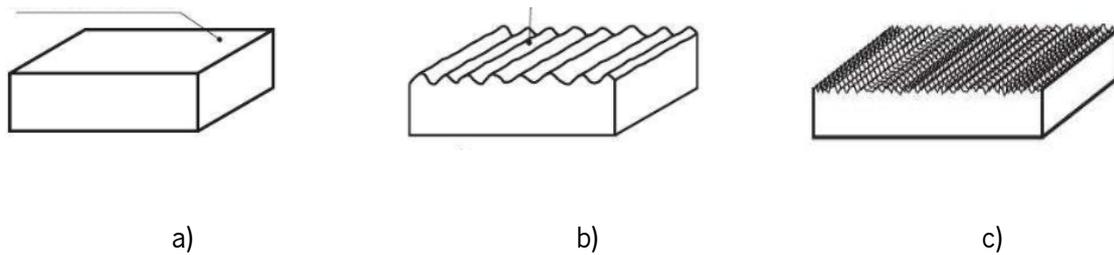


Figura 13 – Ilustração de avaliação do estado das superfícies. a) Superfície geométrica; b) Superfície real; c) Superfície efetiva (adaptado [12]).

Do mesmo modo é conveniente definir os tipos de perfis para que seja mais simples definir a avaliação do estado de superfície, assim temos:

- Perfil real que é o contorno resultante da interseção da superfície real com um plano definido em relação à superfície geométrica.
- O perfil geométrico que é o contorno resultante da interseção da superfície geométrica com um plano definido em relação à superfície.
- O perfil efetivo que é o contorno resultante da interseção da superfície efetiva com a superfície geométrica.



Figura 14 – Avaliação dos tipos de perfis de forma a definir a avaliação do estado de superfície. a) Perfil geométrico; b) Perfil real; (adaptado [12]).

Desta forma o perfil de rugosidade pode ser obtido através do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação. É o perfil apresentado por um registro gráfico, depois de uma filtragem para eliminar a ondulação à qual se sobrepõem geralmente a rugosidade.



Figura 15 – Perfil de rugosidade obtido a partir do perfil efetivo (adaptado [12]).

A composição da superfície é então apresentada a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação após filtragem.

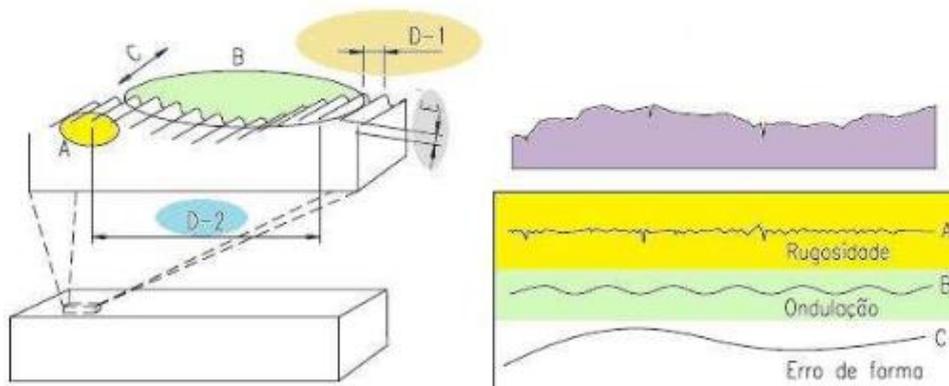


Figura 16 – Elementos que fazem parte da composição de uma superfície (adaptado [12]).

Em que A, é a rugosidade ou a textura primária, constituída pelo conjunto das irregularidades. B, é a ondulação ou a textura secundária, um conjunto de irregularidades causadas por vibrações ou deflexões térmicas do sistema de produção ou do tratamento térmico. Em C, temos a orientação das irregularidades, indicando a direção geral da textura. D é caracterizado como o passo das irregularidades, calculado pela média das distâncias entre as saliências. Por final, E é a altura das irregularidades ou a amplitude das irregularidades.

Para a obtenção de um perfil correto é necessário realizar um ensaio de palpagem na superfície. Mede-se sucessivamente em diferentes pontos da superfície o desvio na direção normal sofrido pela ponta do apalpador, construindo assim um perfil efetivo. A partir do qual se pode retirar o perfil de ondulação e consequentemente contruir um perfil de rugosidades.

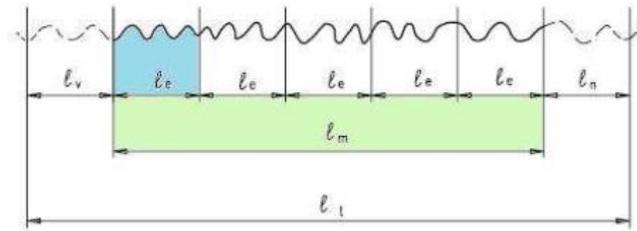


Figura 17 – Critérios de avaliação da rugosidade, avaliação do comprimento cut-off (adaptado [12]).

Na figura acima apresentada, Figura 17, explicam-se claramente os conceitos de comprimento de base (l_e), comprimento de cálculo (l_m) e o comprimento de palpagem (l_t) que são imprescindíveis no cálculo dos parâmetros que quantificam a microgeometria da superfície. Os valores obtidos no primeiro e no último comprimento de palpagem não são utilizados para o efeito de cálculo, pois correspondem às fases de aceleração e desaceleração do dispositivo de medição. Assim a distancia do apalpador deve ser igual a 5 (l_e) mais a distância de aceleração e desaceleração. Como o perfil apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação.

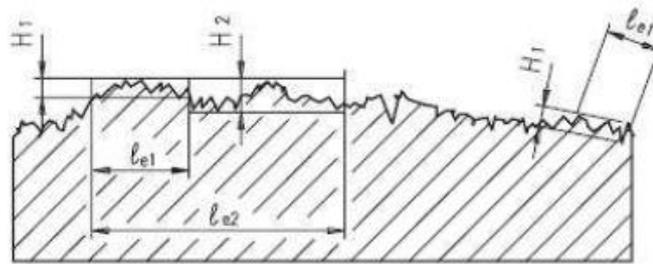


Figura 18 – Critérios de avaliação da rugosidade, avaliação da rugosidade e ondulação (adaptado [12]).

3.4.1. CRITÉRIOS DE RUGOSIDADE

A caracterização completa da microgeometria das superfícies técnicas funcionais necessita de três critérios:

- Parâmetros de amplitude, que avaliam a evolução vertical do perfil.
- Parâmetros de espaçamento, que avaliam a evolução horizontal do perfil.
- Parâmetros híbridos, que são definidos a partir dos dois tipos de evolução (vertical e horizontal)

A linha média, embora não sendo um parâmetro, é um conceito fundamental de definição de diversos critérios, pelo que há a necessidade de caracterização antes de definir o parâmetro utilizado. É definido pela linha media, a linha paralela à direção geral do perfil, de tal forma que a soma das áreas superiores,

compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem l_e .

$$\int_0^L Z(x) dx = 0$$

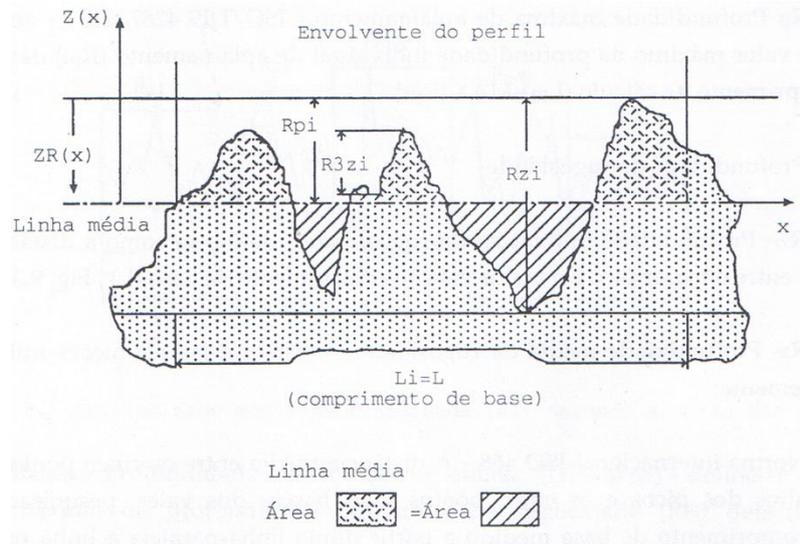


Figura 19 – Envolvente do perfil de rugosidade, linha média (adaptado [12]).

O conceito da rugosidade média aritmética, define-se como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos pontos do perfil em relação à linha média (R_a ou CLA), DIN 4768 e ISSO/DIS 4287/1E. Se definirmos a função $Z(x)$ como a distância entre cada ponto do perfil e a linha média no comprimento de cálculo, temos:

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} Z(x) dx [\mu m]$$

Este é sem dúvida o critério mais utilizado em análises de superfícies rugosas e aquele que será adotado como um parâmetro a utilizar ao longo deste projeto. A simplicidade da sua definição e a sua relativa insensibilidade à presença de picos e vales aberrantes são, provavelmente, as razões principais dessa divulgação.

3.4.2. MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

O método mais primitivo de avaliar as irregularidades superficiais é a vista desarmada e ao tato. Em que com a avaliação da reflexão, de luz, na sua superfície podia ser o suficiente para avaliar se esta tinha um bom acabamento e era ausente de rugosidades. Existem também padrões metálicos, chapas

com rugosidades conhecidas, que permitem por comparação com a superfície a verificar, formar uma ideia aproximada do estado superficial.

Contudo este é um método subjetivo e por isso não é adequado quando há a necessidade de cumprir requisitos técnicos. Desta forma é necessário recorrer a dispositivos capazes de assegurar um elevado padrão de qualidade nas medições. O rugosímetro é o dispositivo designado para o efeito, é um equipamento muito utilizado e de total importância em laboratórios de medição e em linhas de produção.



Figura 20 – Rugosímetro pertencente ao gabinete de metrologia da Universidade do Minho.

O rugosímetro de forma geral, como dito na introdução, é um aparelho eletromecânico destinados à avaliação de rugosidades e de ondulações de peças. É composto pelas seguintes partes: palpador, unidade de acionamento, amplificador e registador. O palpador é o responsável por levar os sinais da agulha “apalpadora” até ao amplificador. O amplificador contém a parte eletrónica principal, que possui um indicador de leitura, ao qual este amplia os sinais da agulha e calcula em função do parâmetro escolhido. A unidade de acionamento desloca o palpador, sendo responsável pela movimentação numa velocidade constante e na distância desejada. Por fim, o registador fornece a reprodução em papel ou visual, do corte efetivo a ser analisado.

4. BIO MIMÉTICA APLICADA A ESTRUTURAS FINAS

O campo emergente da bio mimética permite criar a inspiração no campo da biologia ou da natureza para desenvolver conceitos e aplicar esses mesmos princípios em determinadas áreas da ciência. Desta forma surge comumente a inspiração em nano materiais, nano dispositivos e processos que fornecem propriedades desejáveis. De acordo com o que a própria palavra representa, entende-se por mimética como um conceito que imita a vida. Na Natureza existem milhões de espécies das quais menos de dois milhões estão catalogados até agora. Isto representa uma gigantesca base de dados de soluções inspiradas em sistemas biológicos para a resolução de problemas de engenharia e de outros campos da tecnologia.

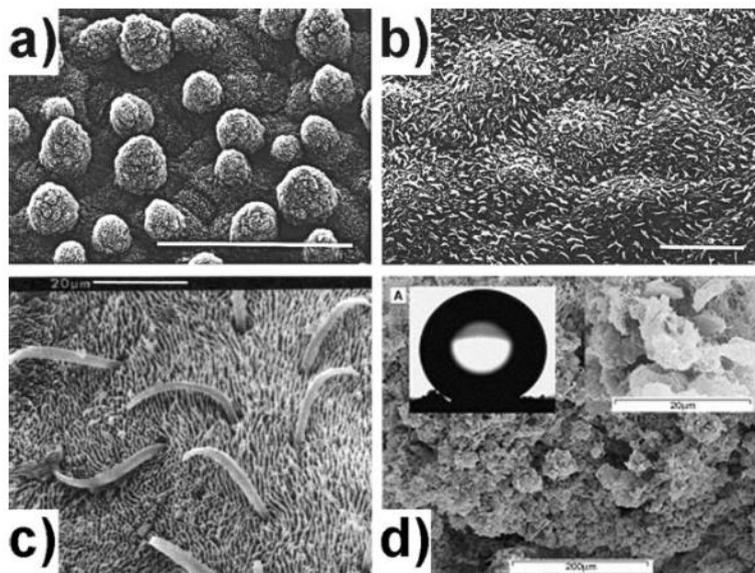


Figura 21 – Vista microscópica de superfícies hidrofóbicas existentes na natureza. a) Flor de lótus; b) Folha de um arbusto; c) Hemíptero conhecido como alfaiate; d) Casca de uma árvore; (adaptado [13])

Cada um dos elementos apresentados na Figura 21, contemplam singularmente propriedades que permitem utilizar a água de diferentes formas, desde a sua repelência e autolavagem até à sua sucção.

Existem vários sectores biológicos aos quais nos direcionam para a estrutura das superfícies rugosas. A maioria destas está presente nas plantas e nas suas folhas. Pela observação microscópica da figura acima apresentada, Figura 21, pode-se verificar vários exemplos que serviram como base no estudo das estruturas hidrofóbicas que são comercializadas atualmente em diversos produtos de diversas áreas.

Arrastar o fluxo de fluido é um dos exemplos encontrados na natureza. Neste capítulo, a natureza demonstra que as superfícies lisas não são sempre as melhores. Exemplo disso encontra-se facilmente em diversos objetos naturais. A superfície da planta de lótus, bem como a pele de tubarão são exemplos bem vivos deste fator. Foram realizados uma série de estudos com um fluxo de água para determinar a eficiência e de redução de contacto nas superfícies. Foi utilizado um canal de fluxo experimental para medir a queda de pressão no escoamento laminar e turbulento, e as tendências são explicadas em termos dos valores medidos e previstos, utilizando paradigmas da dinâmica de fluidos. O comprimento de deslizamento para várias superfícies em fluxo laminar também foi investigado com base na queda de pressão medida.

O efeito das estruturas rugosas no comportamento de escoamento de fluidos, bem como na otimização da sua morfologia, é o foco deste estudo. Para entender o mecanismo da pele de tubarão e a sua redução de arrasto, primeiro é importante entender a natureza do fluxo do fluido sobre uma superfície de pele de tubarão. As características do fluxo e do seu mecanismo de arrasto de fluido também devem ser tidas em conta no seu estudo. Os mecanismos de redução de arrasto por geometrias rugosas serão também apresentados, seguido de uma revisão de estudos experimentais, de uma discussão de dados de otimização de geometrias comuns e outros fatores na seleção da sua geometria de rugosidade superficial.

Sabe-se, que a base deste estudo começou nas superfícies hidrofóbicas inspiradas no clássico exemplo da flor de lótus. A textura da superfície, ou rugosidade, é utilizada para diminuir a viscosidade do fluido nessas superfícies, basicamente utilizando o princípio do ângulo formado no contacto do fluido com a superfície. Estes princípios foram delineados pela primeira vez por Wenzel, em 1936, e logo de seguida por Cassie e Baxter, em 1994. Wenzel sugeria que o contacto do líquido e da superfície seria beneficiado se a superfície fosse rugosa. O seu ângulo de contacto observado neste tipo de superfície seguia a seguinte equação:

$$\cos\theta_e^w = r\cos\theta_e$$

Onde o fator de rugosidade, $r > 1$, era a relação entre a área de contacto verdadeira e a projeção horizontal e θ_e é o equilíbrio do ângulo de contacto numa superfície lisa do mesmo material.

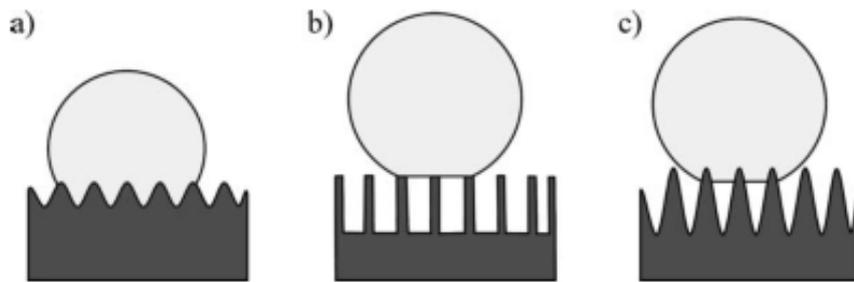


Figura 22 – Superfícies que repelem a gota de fluido. a) Modelo de Wenzel; b) Modelo de Cassie-Baxter; c) Modelo combinado;

Pode ser benéfico para um determinado fluido atravessar a sua superfície por entre picos de ponta plana como denota a figura em b). Tudo isto depende claramente do tipo de fluido e do material de superfície em questão. Este é o princípio que a natureza revela em diversos elementos e o mesmo que o homem tenta introduzir nos seus produtos do dia-a-dia, independentemente da área em questão.

É desta forma que se identifica na bio mimética o princípio de todo este projeto, utilizar princípios básicos que a natureza contém há muitos anos e transferir esses mesmos princípios para outras áreas, nomeadamente a área de fundição. Desta forma pretende-se usufruir das propriedades que uma superfície rugosa tem e utiliza-la de forma a minimizar um dos problemas associados ao vazamento de componentes com espessura reduzida, o escoamento do metal associado à sua solidificação. Adicionando capacidades ao fundido em continuar a fluir, mesmo sabendo que a diminuição de temperatura e o seu processo de solidificação sejam parâmetros que não devem ser esquecidos no capítulo do vazamento.

Com base nos fundamentos teóricos abordados facilmente se percebe que a obtenção de componentes metálicos se processa através da fundição. Esta tecnologia associa como componente térmica o seu principal meio de obter os respetivos componentes. Como princípio base deste projeto é o ter peças finas percebe-se que o conceito bio mimético aqui aplicado nos remete para um campo da transferência de calor. Pois esta área contabiliza uma parte fulcral no momento de um vazamento, em que as propriedades térmicas do fluido vão ser responsáveis pelo enchimento das cavidades da moldação. Assim parte-se agora para a análise da contribuição que a rugosidade pode vir a ter no campo da transferência de calor.

5. EFEITO DA RUGOSIDADE NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E FLUIDEZ

Existem vários e diferentes estudos que permitem estabelecer o comportamento da transferência de calor perante paredes compostas por rugosidade superficial. Muitos destes estudos são conclusivos no sentido de utilizar a rugosidade de forma a contribuir para obter um melhor perfil de velocidade e consequentemente obter resultados experimentais ideais para o sentido do fluxo e de escoamento.

O efeito da rugosidade superficial na pressão e na transferência de calor em tubos circulares de diâmetros reduzidos é um facto que tem sido extensamente estudado na literatura. O estudo pioneiro de *Nikuradse* [3] estabeleceu que a rugosidade provocada pelo grão de areia é um parâmetro importante na ocorrência do atrito que tem como consequência o tipo de escoamento envolvido, podendo ser laminar, de transição ou turbulento.

As Investigações recentes, do comportamento do escoamento turbulento em tubos lisos, canais, e ao longo de placas têm aumentado muito e existem agora informações suficientemente credíveis que representam a forma como se apresenta a distribuição de velocidade, bem como as leis que a controlam. Tais dados abrangem o comportamento turbulento destes problemas de fluxo. O desenvolvimento lógico seria agora indicar um estudo das leis que regem o fluxo turbulento de fluidos em tubos, canais e superfícies planas ao longo de superfícies que contenha rugosidade.

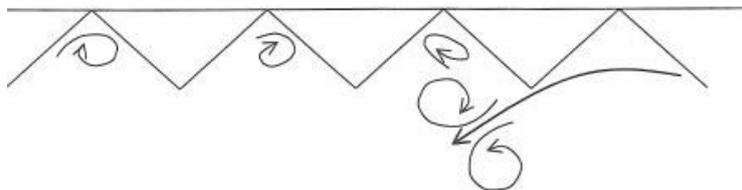


Figura 23 – Esboço de uma ideia do comportamento do fluxo através de uma parede rugosa (adaptado [14]).

Um estudo de um destes problemas, devido à sua ocorrência frequente na prática, é mais do que importante o estudo do fluxo ao longo de superfícies lisas e é também de grande interesse como uma extensão do nosso conhecimento físico de fluxo turbulento.

Outra abordagem importante está presente no escoamento de um fluido entre paredes rugosas, Figura 23. É outro alicerce de estudo bastante abordado, começando por ser objeto principal de estudo quando se percebeu que existiam perdas de pressão nas condutas de água por parte de Hagen (1854) e Darcy (1857) [15]. Ambos defendiam que se as condutas não eram suficientemente rugosas então o escoamento que desenvolveriam seria significativamente lento. Assim a perda de pressão nas condutas

só era independente da viscosidade do fluxo no limite da parede com rugosidade. Esta independência foi o principal princípio que os alertou para que algo estava incorreto com a teoria do escoamento laminar. Assim se definiu que os fluxos de escoamento nunca poderiam ser turbulentos em paredes totalmente lisas.

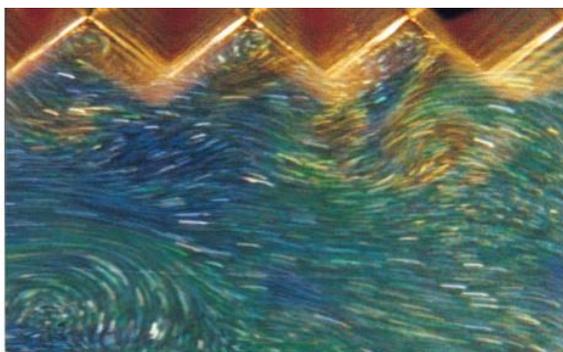


Figura 24 – Comportamento do fluxo de escoamento através de uma superfície rugosa (adaptado [14]).

O efeito mais importante da rugosidade está relacionado com o perfil de velocidade média que se pode atingir no fluxo da parede de escoamento, devido à constante modificação do coeficiente de atrito gerado, Figura 24. Como foi alvo de estudo, chegou-se à conclusão que o efeito da rugosidade no escoamento turbulento é controlado por dois parâmetros dimensionais. O primeiro parâmetro está relacionado com o número de Reynolds e este quantifica a interferência da rugosidade com a camada de fluxo. O regime transitório de rugosidade pode estar relacionado com a geometria da superfície irregular. O segundo parâmetro, cuja importância tem sido extremamente reconhecida, é a relação entre a altura e a espessura da camada limite da rugosidade. Desta forma é possível quantificar o efeito direto da rugosidade numa camada logarítmica, onde a maior energia de produção e o valor médio de tensão de corte estão concentradas.

A principal conclusão desta inspeção, dedicada à estrutura turbulenta, é que o assunto está longe de ser compreendido. Há experiências conflitantes em quase todos os casos e, mesmo para as quantidades em que as tendências são claras, o colapso de dados é pobre. Isto é devido, em parte, à ênfase industrial de muitas investigações experimentais, que não procuram estudar a estrutura do fluxo. Também faz parte do problema a variedade de superfícies ásperas, que influenciam fortemente a dinâmica da camada de rugosidade. Para esclarecer esta questão é necessário caracterizar bem o conjunto de experiências a realizar, bem como registar e documentar o âmbito em que estas experiências se inserem.

6. CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS

6.1. Liga A356

Este é um tipo de liga de alumínio com vasta aplicação em diversos setores da indústria automóvel e aeroespacial muito devido ao seu baixo peso e capacidade de carregamento. É caracterizada pela sua composição dos elementos de liga como o alumínio, o silício e o magnésio, tratando-se assim de uma liga hipoeutética onde o teor em silício é aproximadamente 7%, como se pode observar pela visualização da Figura 25. Tem excelentes propriedades no que toca à sua fundição e uma grande adaptabilidade às diferentes técnicas de obtenção de componentes. O silício presente na liga, aumenta a fluidez e reduz a contração do material durante o arrefecimento, assim como a respetiva expansão térmica do fundido.

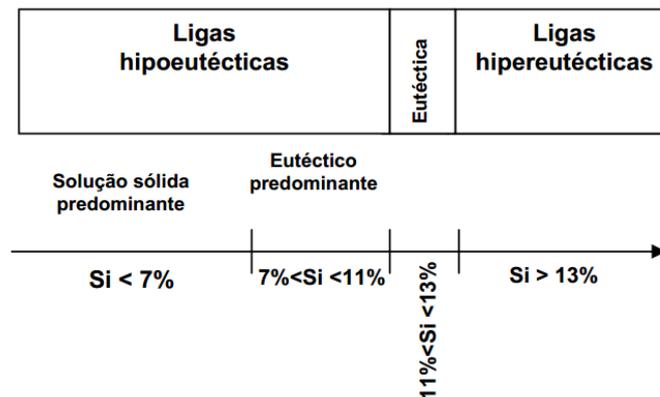


Figura 25 – Composição química das ligas hipoeutéticas, eutéticas e hipereutéticas (adaptado [16]).

De seguida são apresentadas algumas das principais propriedades físicas e mecânicas bem como a sua composição química desta liga.

6.1.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

Tabela 3 – Propriedades físicas da liga A356.

Densidade	2,685 (20°C)
Calor específico (térmico)	963 J/Kg.K (100°C)
Calor latente de fusão	389 KJ/Kg
Temperatura de fusão	675°C a 815°C
Temperatura de vazamento	675°C a 790°C

6.1.2. DIAGRAMA AL-SI-MG

Certas combinações de magnésio e silício podem apresentar efeitos quando estes são ligados ao alumínio. O diagrama seguinte apresenta as curvas de solubilidade, sólida e líquida.

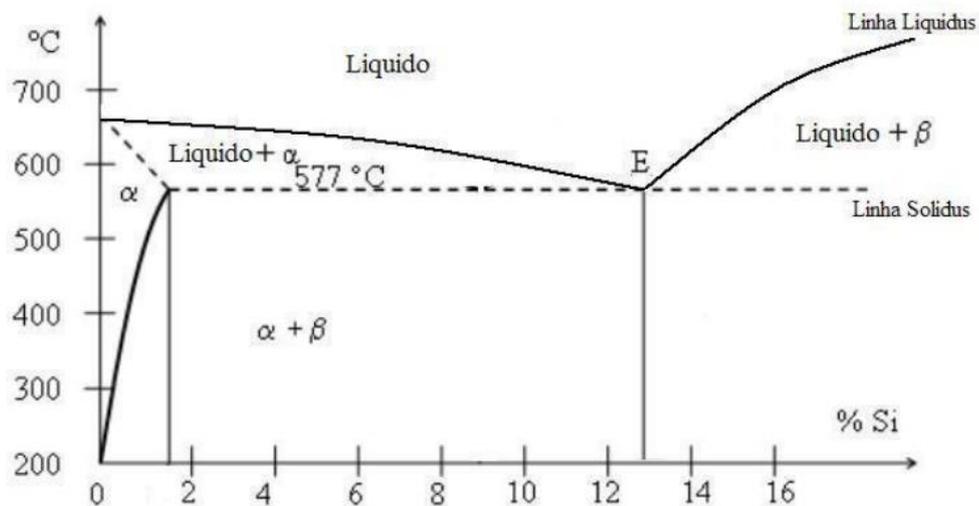


Figura 26 – Diagrama de fases da liga de alumínio A356 (adaptado [17]).

Segundo o diagrama da Figura 26, entre a linha *liquidus* e a linha *solidus* existe uma região onde ocorre a solidificação, no estado semi-sólido, ocorrendo os fenômenos de nucleação e crescimento dos grãos dendríticos. Existem duas soluções sólidas α e β . A composição eutética a 12,7% em peso de Si é uma estrutura de ($\alpha + \beta$). A fração da solução sólida α ao nível do eutético ronda os 50% em peso, para uma temperatura aproximadamente de 572°C [17].

6.1.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Na seguinte tabela estão apresentados os limites máximos de composição da liga A356.

Tabela 4 – Composição química da liga A356.

Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	Al
6,7 a 7,3	0,30 a 0,40	0,04	0,10	0,14	0,10	0,10 a 0,15	Restante

O silício (Si), tem como principal função melhorar a fluidez do metal e diminuir a possibilidade de ocorrência de fissuras e o coeficiente de dilatação. Este elemento promove um aumento de resistência à tração e da dureza.

O magnésio (Mg), é o segundo elemento em maior percentagem e é o responsável por garantir o melhoramento das características mecânicas e da ductilidade.

O cobre (Cu), promove um aumento da resistência à tração e da dureza. Em contrapartida é responsável por afetar o alongamento.

O Ferro (Fe), quando presente em combinação com o silício pode criar uma estrutura frágil, causando a deterioração da resistência mecânica.

O zinco (Zn), induz a aumento das características mecânicas e diminui o efeito da corrosão. Se for adicionada exageradamente pode contribuir para uma fragilidade elevada da liga a quente.

O titânio (Ti), é utilizado para refinar o grão do metal, o que contribui indiretamente para o aumento das características mecânicas.

Podem adicionar-se ainda elementos como o crómio (Cr), o níquel (Ni) e o manganês (Mn), para melhorar a resistência à tração principalmente a temperaturas elevadas.

No caso dos valores de impurezas estabelecidos serem ultrapassados o alto teor em cobre e níquel decresce a ductilidade e a resistência à corrosão. O alto teor em ferro diminui a resistência e ductilidade.

6.1.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A tabela seguinte apresenta as propriedades de tração da liga A356 quando submetida a diferentes temperaturas.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga A356 [18].

Temperatura de serviço (°C)	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
24	230	165	3,5
150	160	140	6,0
205	85	60	18
260	50	35	35
315	30	20	60

6.1.5. SOLIDIFICAÇÃO

Esta liga é caracterizada por ter uma velocidade de arrefecimento relativamente alta, o que conduz diretamente a benefícios microestruturas significativos que resultam numa melhoria das propriedades mecânicas do fundido. Pois uma solidificação rápida leva ao refinamento do tamanho do grão.

Esta taxa de solidificação alta reduz a quantidade de segregação na liga. Assim reduzem-se as distâncias de salificação e o grau de soluto as dendrites e nos contornos do grão é também reduzido. Em resultado obtém-se menos impurezas insolúveis e diminui-se o volume das fases intermetálicas, aumentando assim a tenacidade.

Para ligas hipoeutéticas a solidificação ocorre através da formação de dendrites, que crescem no intervalo de solidificação, formando uma rede dendrítica. Estas ligas têm uma temperatura de arrefecimento bem definida, bem como um metal puro, possuem um patamar que indica a temperatura de arrefecimento

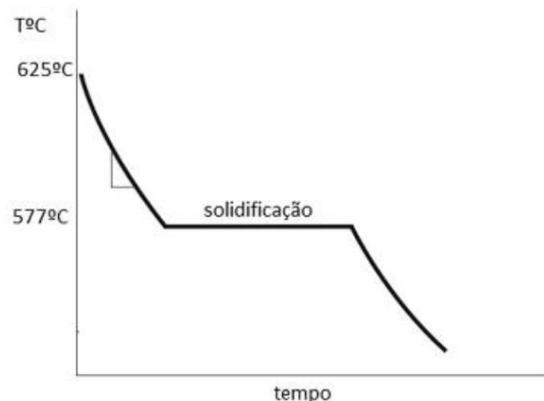


Figura 27 – Linha de arrefecimento para uma liga eutética (adaptado [17]).

Na figura acima apresentada, pode-se verificar o arrefecimento típico de uma liga eutética para um arrefecimento lento. Em termos reais ocorre um sobreaquecimento antes de se atingir o patamar de solidificação.

A sequência de solidificação desta liga passa por quatro principais estágios, nomeadamente.

- Formação de dendritas da fase Al- α ,
- Formação das células eutéticas (fase Al- α + fase Si) e fases ricas em ferro,
- Formação do eutético secundário (fase Al- α + Al₂Cu + Mg₂Si + fases ricas em ferro),
- Formação do eutético terciário (fase Al- α + fase Si + Al₂Cu + Al₅Cu₂Mg₈Si₆)

6.2. Liga CuSn

Maioritariamente conhecida como Bronze, esta liga metálica é formada pela composição de dois elementos o cobre (Cu) e o estanho (Sn), podendo conter ainda outros elementos dependendo do seu campo de aplicação. Apresenta-se sob a forma de um metal quase dourado e caracteriza-se de forma bastante peculiar. Esta liga é bastante maleável e dúctil, apresentando assim também uma boa flexibilidade o que comparativamente ao ouro tem bastantes semelhanças e esta é a principal razão para a utilização desta liga neste projeto. As suas características principais são a elevada condutividades elétrica e térmica boa resistência à corrosão à fadiga e boa facilidade de reprodutibilidade.

6.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

Tabela 6 – Propriedades físicas da liga CuSn utilizada.

Densidade	8,94 g/cm ³ (20°C)
Calor específico (térmico)	140 – 800 J/Kg.k (100°C)
Calor latente de fusão	200 KJ/Kg
Temperatura de fusão	990°C a 1083°C
Temperatura de vazamento	1083°C

6.2.2. DIAGRAMA FASES CU-SN

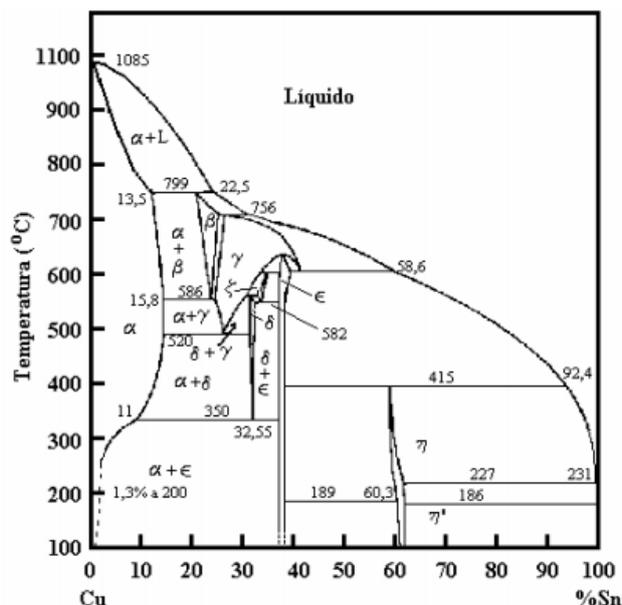


Figura 28 – Diagrama de fases da liga binária CuSn (adaptado [17]).

6.2.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Na tabela abaixo apresentada indica os valores percentuais da composição dos elementos que constituem e liga de bronze, de acordo com a norma portuguesa NP-961.

Tabela 7 – Composição química da liga binária CuSn.

Tipo	Cu	Sn
CuSn x	80% a 98%	2% a 20%
CuSn 20	80%	20%
CuSn 40	60%	40%

O cobre comercial contém sempre impurezas que podem influenciar as suas propriedades físicas, principalmente na condutividade elétrica, e nas propriedades mecânicas cuja a natureza e o seu teor depende do processo de fundição. As impurezas que podem estar presentes são principalmente o chumbo, o enxofre e o oxigénio.

O estanho aumenta a resistência à tração, mas diminui a ductilidade quando é usado teores acima de 1%.

6.2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A tabela seguinte apresenta as características mecânicas que a liga de bronze apresenta normalmente.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas da liga CuSn.

Dureza	460 – 2400 MPa
Módulo de cisalhamento	25 – 46 GPa
Módulo de elasticidade longitudinal	70 – 120 GPa
Limite elástico	65 – 500 MPa
Tensão compressão	65 – 700 MPa
Tensão rutura (tração)	140– 800

6.2.5. SOLIDIFICAÇÃO

Com base no diagrama de fases Cu-Sn consegue-se perceber o comportamento desta liga à qual comporta sete fases principais com cinco pontos peritéticos, um ponto eutético e quatro pontos eutectóides. Após a solidificação, para teores de estanho entre 0% e 13,5% a 800°C, forma-se a solução sólida α de estrutura cristalina cúbica de faces centradas. Para valores $13,5\% < \text{Sn} < 25,5\%$ a 800°C, ocorre uma reação peritética que resulta num arrefecimento da fase β , solução sólida de estrutura cúbica de corpo centrado [17].

Neste intervalo percentual as ligas podem ser bifásicas, $\alpha + \beta$ ou monofásicas, β . Durante o arrefecimento a fase β transforma-se em γ a 586°C e esta sofre uma transformação eutectóide.

Um grande intervalo de solidificação permite uma difusão tao lenta que o constituinte δ chega a aparecer em fundições com 7% de Sn. Daqui resulta que ligas com maior percentagem de estanho são dificilmente laminadas, assim estas ligas são deformáveis a quente (fases $\alpha + \beta$) ou deformáveis a frio depois de uma têmpera e um recozimento.

7. ESTUDOS ANALISADOS

De seguida apresentam-se três estudos envolvendo a transferência de calor e o efeito da rugosidade. Todos os estudos são académicos e o seu objetivo é determinar qual a influência deste parâmetro. São estudos referenciados e com princípios base deste projeto – determinar a influência da rugosidade na transferência de calor.

7.1. Estudo da influência das superfícies rugosas na transferência de calor.

Basicamente este estudo [19], consistiu numa análise experimental que se pretende verificar a influência que uma superfície rugosa pode ter na taxa de calor transferida no alumínio. Para tal é utilizado um papel de areia à base de sílica (lixa), para polir os materiais de ensaio e criar as superfícies rugosas nas amostras. As texturas das superfícies da amostra de alumínio foram medidas utilizando um microscópio Olympus LEXT 3100 (laser scanning).

Os efeitos da rugosidade da superfície na transferência de calor ainda não estão totalmente conhecidos. A razão desta experiência é proporcionar diversas observações iniciais sobre os efeitos que as texturas da superfície têm, podendo aumentar a quantidade de calor transferido. Os conhecimentos obtidos nesta experiência podem aprofundar os estudos em metrologia da superfície e pode melhorar os produtos que são utilizados hoje em dia e, possivelmente, no futuro.

Há pouco conhecimento sobre os efeitos da rugosidade na transferência de calor. Um efeito bem conhecido que a rugosidade superficial tem sobre a transferência de calor é a emissividade. Emissividade é definida como a razão entre a radiação emitida pela superfície a uma dada temperatura e para a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. A ciência da mecânica dos fluidos define um corpo negro perfeito como um emissor e um absorvente de radiação; a uma temperatura especificada e de comprimento de onda não superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro. Emissividade afeta apenas a transferência de calor radiante. Como explicado em livros, "Propriedades de emissividade dependem fortemente das condições de superfície". Esta incerteza é em grande parte devido à dificuldade de caracterizar e descrever as condições da superfície com precisão." Infelizmente mais não é conhecido sobre a rugosidade da superfície e os seus efeitos sobre o calor transferido.

A Norma ASTM E-781 foi utilizada como um guia para a montagem da caixa de teste. A caixa de teste é uma panela de alumínio que foi pintada de preto no seu interior, conforme especificado pela norma. A cobertura para a caixa foi construída a partir de uma folha de alumínio e utilizada para evitar que a temperatura no interior seja afetada por fontes exteriores para além da luz de teste. Para minimizar

os efeitos de transferência de calor por convecção no material de teste, os espaçadores de vidro foram utilizados para aumentar o material de teste para fora da caixa de teste. Espaçadores de vidro foram utilizados para a sua área de superfície e baixo coeficiente de transferência de calor baixo. Um pedaço de folha de alumínio foi utilizado para proteger o termopar e evitar possíveis leituras falsas de exposição direta à lâmpada de teste.

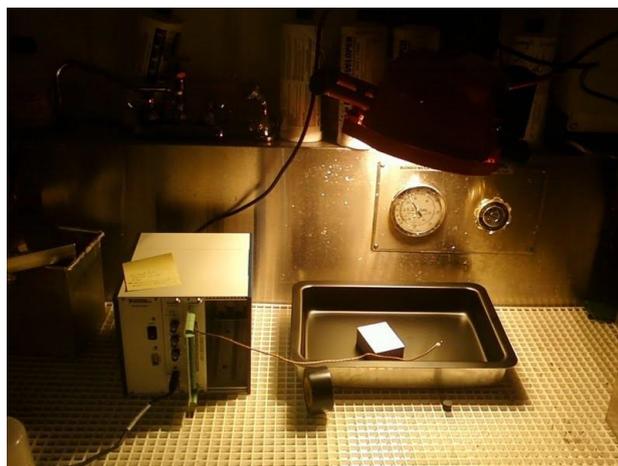


Figura 29 – Caixa de teste com uma amostra no seu interior (adaptado [19]).

As superfícies das amostras de teste foram preparadas utilizando diferentes lixas e polidas manualmente de modo a obter o estado desejado. O uso de papel de areia provou ser eficaz, mas demorado. O processo também não foi uniforme, que foi difícil de produzir a mesma textura ao longo do material do ensaio. A textura inconsistente dos materiais de ensaio pode ter afetado os resultados desta experiência.



Figura 30 – Amostras de teste: Normal, SP120, SP240, SP400, SP600, respetivamente (adaptado [19]).

Além disso, enquanto foi efetuado um polimento com o grão de 600, notou-se uma descoloração na superfície do material. Durante o polimento do material de ensaio tornou-se mais escura. Isto também afetou os resultados devido ao aumento da energia absorvida pelo material mais escuro. O material de teste, SP600, polido com uma granulometria de 600, foi considerado como a maior rugosidade criada.

Todos os materiais de teste foram pesados após o polimento. Antes do ensaio, cada amostra foi limpa e a sua temperatura inicial foi registada.



Figura 31 – Placa eletrónica de aquisição de dados da temperatura no interior da caixa (adaptado [19]).

A Tabela 9, mostra a temperatura e a respetiva diferença de temperaturas inicial e final, registada durante o teste.

Tabela 9 - Registo da temperatura final e da diferença de temperatura registada para cada amostra tratada (adaptado [19]).

Amostra	Temperatura final °C	Diferença de temperatura °C
Normal	45,104	18,997
SP120	43,272	15,760
SP240	41,158	14,158
SP400	43,037	16,433
SP600	51,009	24,988

Nos seguintes gráficos, Figura 32 e Figura 33, é possível observar o comportamento das diferentes taxas de calor geradas para cada superfície testada. A temperatura inicial do teste foi sempre a ambiente (20 °C).

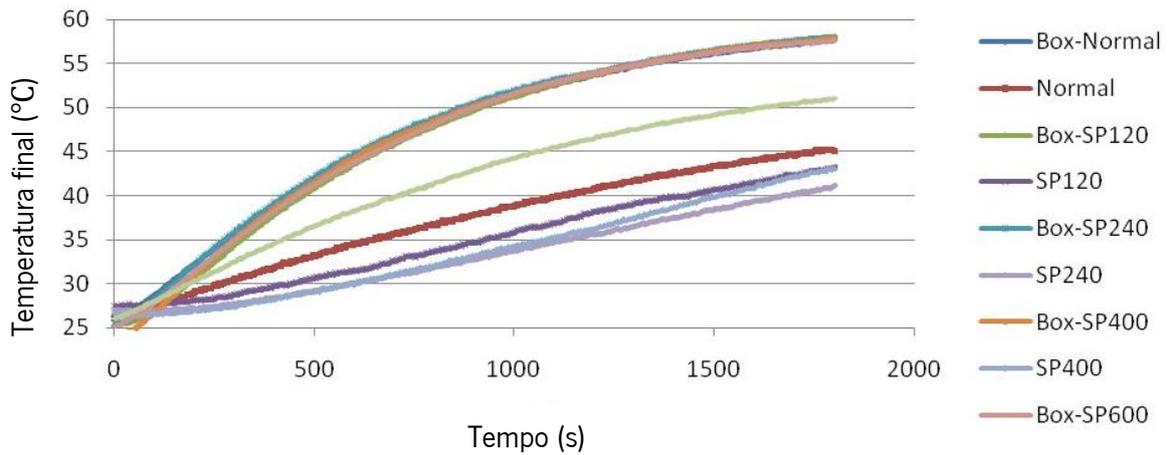


Figura 32 – Gráfico da evolução da temperatura para cada amostra (adaptado [19]).

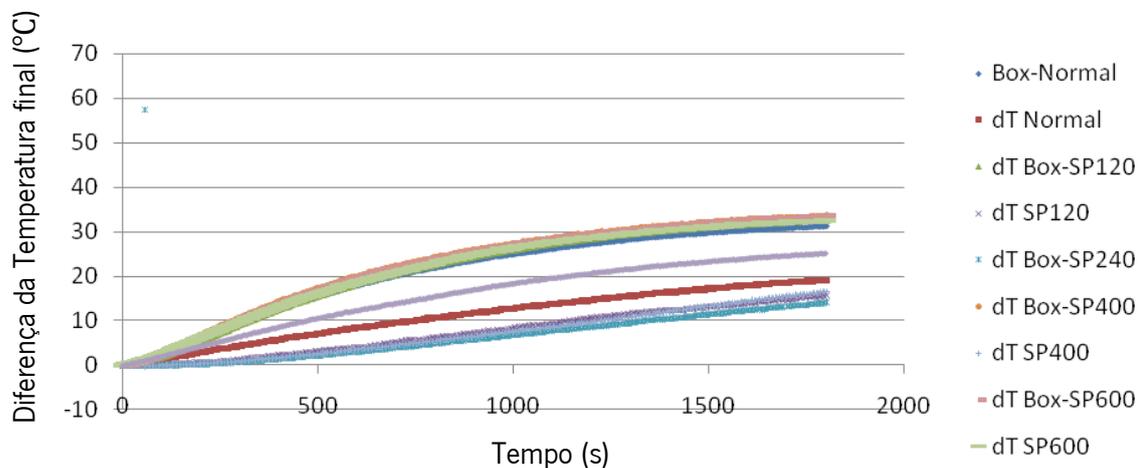


Figura 33 – Gráfico da diferença de temperatura registrada para cada amostra testada (adaptado [19]).

Apresentados os resultados obtidos e visualizado os gráficos detalhados pode agora tecer-se algumas conclusões.

A técnica de pré-tratamento de superfícies (polimento), tais como as técnicas de chanfrar arestas, podem ser implementadas para promover uma textura de superfície, mesmo para resultados mais precisos.

A medição precisa da relação entre a alteração da temperatura em relação à rugosidade da superfície não pode ser obtida. Lixar as amostras de teste à mão introduziu problemas relacionados com a falta de uniformidade da textura da superfície, para cada amostra e através do conjunto de amostras.

Uma das principais observações encontradas é que alterando a textura da superfície de alumínio nota-se uma alteração na quantidade de calor transferido. Quanto mais rugosa for a superfície, maior é a taxa de calor transferida.

7.2. Rugosidade das superfícies no vazamento, utilizando moldação em gesso.

O objetivo deste estudo [20] foi determinar a influência do tipo de molde de gesso e da sua temperatura, no momento de fusão das ligas, bem como a influência que tem na rugosidade da superfície dos moldes experimentais.

São apresentados na análise deste artigo os resultados dos estudos sobre a rugosidade superficial de em ligas de alumínio e de cobre-estanho preparadas através de um molde gesso. As amostras foram cortadas com as dimensões de 100x15x1 mm. As superfícies foram cuidadosamente limpas com a utilização do ultrassons e seguidamente lavadas e secas.

As temperaturas de moldação entre ambas as ligas foram alteradas de forma a averiguar as diferenças, por outro lado a medição da rugosidade foi realizada com recurso a um rugosímetro com base no desvio médio aritmético Ra. A rugosidade da superfície depende, de facto, do material fundido. Os tipos de parâmetros adicionais como o tipo de gesso (Gold Star e Prima Cast) e tipo de fundição têm uma influência desprezável.

Primeiramente criam-se a rugosidade nas amostras através do contacto de um fluxo de partículas de vidro com as respetivas amostras. Posteriormente são montadas em canais de cera. É criado o gesso e o respetivo mole no seu interior. O molde é colocado na mufla com as condições ideais até estar completamente homogéneo e de seguida é realizado o vazamento. No final as amostras fundidas são analisadas através de um rugosímetro que vai medir o valor de rugosidade criado nas amostras.

A seguinte Tabela 10, apresenta um resumo das características dos vazamentos efetuados. A moldação recebeu um tratamento térmico de acordo com o que apresenta a seguinte Figura 34.

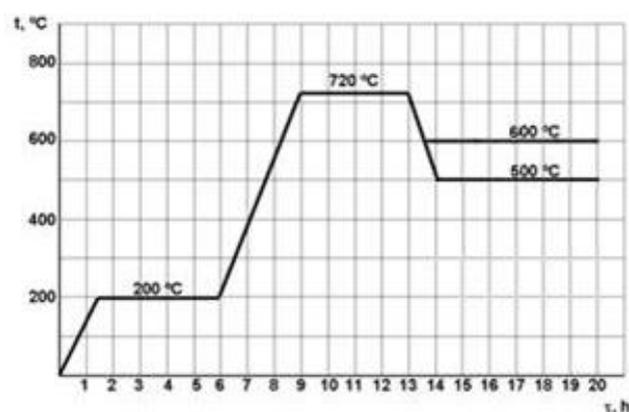


Figura 34 – Tratamento térmico efetuado na moldação em gesso, (adaptado [20]).

Tabela 10 – Materiais e parâmetros utilizados para as diferentes ligas, no processo experimental (adaptado [20]).

Material de gesso	Gold Star				Prima Cast			
Material	CuSn10							
Temp. de vazamento (°C)	1200		1120		1200		1120	
Temp. de moldação (°C)	500	600	500	600	500	600	500	600
Nr. da amostra	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4
Material	CuSn5Zn5Pb5							
Temp. de vazamento (°C)	1200		1120		1200		1120	
Temp. de moldação (°C)	500	600	500	600	500	600	500	600
Nr. da amostra	3-1	3-2	3-3	3-4	4-1	4-2	4-3	4-4
Material	AlSi11							
Temp. de vazamento (°C)	800		700		800		700	
Temp. de moldação (°C)	300	250	300	250	300	250	300	250
Nr. da amostra	5-1	5-2	5-3	5-4	6-1	6-2	6-3	6-4

Os resultados das medições obtidas estão apresentados nas tabelas seguintes, Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 – Resultados do vazamento experimental para o molde de gesso “Gold Star XI” (adaptado [20]).

Vazamento da liga CuSn10			Resultados da medição de rugosidade (µm)		
Amostra	Temp. de vazamento (°C)	Temp. de moldação (°C)	Ra	Rz	Rm
1-1	1200	500	0,99	7,73	10,26
1-2		600	0,98	8,52	11,38
1-3	1120	500	1,69	11,82	14,04
1-4		600	1,22	9,28	12,08
Vazamento da liga CuSn5Zn5Pb5					
Amostra	Temp. de vazamento (°C)	Temp. de moldação (°C)	Ra	Rz	Rm
3-1	1200	500	1,67	11,71	14,74
3-2		600	2,58	17,02	25,13
3-3	1120	500	1,58	11,05	13,42
3-4		600	1,14	8,2	10,69
Vazamento da liga AlSi11					
Amostra	Temp. de vazamento (°C)	Temp. de moldação (°C)	Ra	Rz	Rm
5-1	800	300	0,69	4,34	5,66
5-2		250	0,83	4,92	10,24
5-3	700	300	0,64	4,58	8,98
5-4		250	0,69	4,16	6,29

Tabela 12 – Resultados do vazamento experimental para o molde de gesso “Prima Cast” (adaptado [20]).

Vazamento da liga CuSn10			Resultados da medição de rugosidade (μm)		
Amostra	Temp. de vazamento ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. de moldação ($^{\circ}\text{C}$)	Ra	Rz	Rm
2-1	1200	500	0,96	6,41	7,9
2-2		600	0,98	7,07	8,6
2-3	1120	500	0,88	6,77	9,38
2-4		600	1,36	9,97	12,73
Vazamento da liga CuSn5Zn5Pb5					
Amostra	Temp. de vazamento ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. de moldação ($^{\circ}\text{C}$)	Ra	Rz	Rm
4-1	1200	500	1,28	9,64	13,63
4-2		600	1,74	12,01	14,69
4-3	1120	500	2,6	17,17	21,55
4-4		600	1,5	12	19,59
Vazamento da liga AlSi11					
Amostra	Temp. de vazamento ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. de moldação ($^{\circ}\text{C}$)	Ra	Rz	Rm
6-1	800	300	0,72	4,89	6,89
6-2		250	0,62	3,69	4,81
6-3	700	300	0,59	4,57	7,75
6-4		250	0,6	4	4,96

A análise dos resultados do teste não revelou uma dependência clara entre a rugosidade da superfície de fundição e os métodos de preparação. Em geral, pode-se assumir que a rugosidade testada nos moldes de gesso é muito baixa, quando comparadas com moldes de matrizes de pressão.

A propagação das médias dos parâmetros medidos é definitivamente mais elevada no caso de ligas de alumínio. Este é um resultado do aumento da temperatura do molde e do metal fundido, portanto, mais intensiva é a influência de uma liga metálica sobre a superfície da cavidade. A obtenção do padrão de cera ideal é muito difícil. Do ponto de vista prático, pois sabe-se que a qualidade do padrão influencia o estado da rugosidade da superfície de vazamento. Este problema requer mais pesquisas. Em suma as análises dos resultados de medição permitem formular as seguintes conclusões. A primeira é referente à tecnologia de fundição com vácuo em moldes de gesso, esta permite a preparação de moldes com rugosidade superficial muito baixo. A segunda diz-nos que a rugosidade das superfícies de fundição depende sempre do material fundido.

Por outro lado verifica-se que a rugosidade da superfície a fundir não depende claramente do material da moldação, nem da sua temperatura e temperatura da fusão do material.

7.3. Efeito da rugosidade superficial na transferência de calor no contacto entre duas partículas

Este trabalho [21] foi desenvolvido para simular a importância da transferência de calor no contato de duas partículas, para tal foi utilizado o método de elementos finitos para simular todo o processo. Este processo é simulado pelo contacto estático de partículas.

Verificou-se que a transferência de calor de contacto e que o fluxo de corrente através de uma superfície esférica tem uma boa semelhança na forma como são afetados pela rugosidade da superfície das partículas. No entanto, esta não é uma tendência comum porque uma maior rugosidade da superfície produz uma maior resistência de contacto.

Basicamente este estudo consiste na existência de duas esferas de aço inoxidável (SUS304) com diâmetros de 19,8 mm, as quais são submetidas a criação de várias rugosidades na sua superfície. Uma das duas partículas, foi aquecida a 150 ° C, enquanto a outra foi mantida à temperatura ambiente, exatamente a 21 ° C. Esta foi a condição definida como a condição inicial das partículas antes de serem postas em contacto. As forças de contacto externas vão desde 100N a 500N, controladas utilizando um medidor de força. Enquanto isso, a alteração da temperatura foi medida por meio de um termopar tipo K, que foi inserido no centro da partícula.

A transferência de calor total de partícula mais quente para a mais fria foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$Q = mc \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Em que m é a massa da esfera e c o calor específico da partícula. A principal fonte de transferência de calor em jogo é por condução, o que faz com que a precisão do cálculo não seja tão precisa.

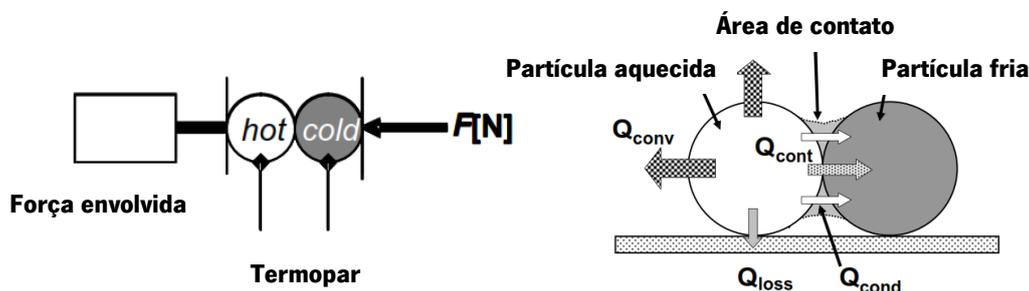


Figura 35 – Princípio do esquema experimental estático da transferência de calor entre as duas esferas (adaptado [21]).

Tabela 13 – Condições experimentais (adaptado [21]).

d_p [mm]	19.8
m [kg]	2.82×10^{-2}
ρ [kg/m ³]	7.93×10^3
c [J/kg.K]	0.5×10^3
λ [W/m.K]	0.0257
R_A [μ m]	0.06, 0.57, 0.90, 1.23
Heated Temp. [°C]	150
D.C. Volt [V]	6.0
F [N]	100, 200, 300, 400, 500

As partículas postas em contacto possuem rugosidades diferentes que foram observadas microscopicamente. O seu valor é quantificado através do seguinte gráfico e do valor R_a .

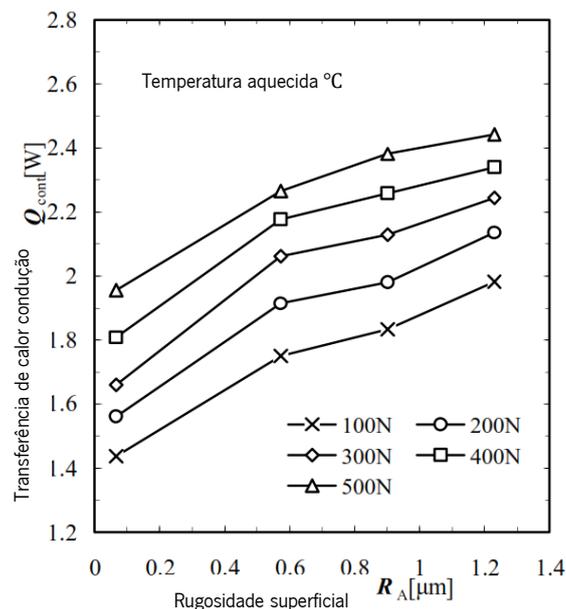


Figura 36 – Gráfico do calor transferido entre o contacto das partículas em relação á sua rugosidade superficial (adaptado [21]).

Os dados do presente trabalho revelam uma semelhança entre a transferência de calor e a rugosidade superficial das partículas em contacto. O que se pode concluir é que na realização deste estudo á medida que a rugosidade das superfícies aumenta, a transferência de calor envolvida tende a aumentar também. Isto porque com o aumento da rugosidade, a área de contato real envolvida tende a aumentar, provocando a mesma tendência na transferência de calor.

III – COMPONENTE DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

8. INTRODUÇÃO EXPERIMENTAL

Este é o capítulo onde todo o envolvimento prático, do decorrer do projeto, está resumidamente explícito. Pretende-se detalhar e identificar todos os constituintes deste processo experimental de forma a descrever com algum detalhe todas as variáveis e os fatores que de algum modo contribuíram ou manipularam os resultados encontrados.

Tudo isto porque se defende a ideia inicialmente apresentada, criando uma superfície rugosa nos canais de enchimento proporciona um menor contacto direto com as paredes, o que vai influenciar o efeito da transferência de calor. Sabe-se que se existir um contacto direto com a temperatura ambiente das paredes o fluido tende a solidificar mais rapidamente, o que pode eventualmente provocar um mau enchimento de todas as cavidades do material.

Desde a forma como se criaram as rugosidades, o tipo de amostras elaboradas, a forma como foram preparadas ou até mesmo os valores de temperaturas utilizados estão de seguida documentados e devidamente esclarecidos. É sabido que a tecnologia envolvente na atividade prática é realizada através de fundição com cera perdida e com moldação cerâmica. Todo o desenvolvimento prático, em termos individuais, é realizado de forma sequencial como se apresenta na tabela seguinte, Tabela 14.

Tabela 14 – Breve resumo do procedimento experimental realizado para cada atividade experimental.

	Etapas	Procedimento
1	Preparação de amostras	Corte e tratamento da superfície das amostras elaboradas.
2	Molde de cera	Elaboração da respetiva árvore, em cera, que contém as amostras com os diferentes níveis de tratamento das superfícies.
3	Estrutura de Moldação	Colocar a árvore de cera no interior de uma caixa de moldação cilíndrica.
4	Moldação cerâmica	Elaboração do gesso e posteriormente vazamento no interior da moldação.
5	Tratamento térmico	O conjunto do molde e da moldação é submetido a um tratamento térmico.
6	Vazamento	Vazamento do metal líquido na Indhuterm.
7	Abate da moldação	Destruir gesso contido no interior da moldação e retirar amostra fundida.

De seguida, nos capítulos posteriores, são pormenorizadas as etapas elaboradas no decorrer da atividade experimental de acordo com o alinhamento apresentado na Tabela 14. Assim pretende-se que os principais passos que levaram à realização deste projeto estejam devidamente expostos de uma forma simples e concisa.

8.1. Preparação das amostras

Como o ponto fulcral deste projeto é a otimização da fundição de estruturas finas, é necessário utilizar amostras que cumpram tais requisitos. Estas amostras são necessárias para posteriormente se criarem as cavidades na moldação em gesso. Inicialmente são submetidas a um tratamento superficial, para de seguida serem agrupadas numericamente numa árvore em cera. Posteriormente, ao colocar-se a moldação no forno e elevando a temperatura até a temperatura de fusão do acetato, este tende a desaparecer. Criando assim as cavidades no interior do gesso, de acordo como refere o tipo de tecnologia envolvente.

8.1.1. MODELO EXPERIMENTAL

O modelo do acetato tem uma forma paralelepipedal com as dimensões padrão de $70 \times 4 \times e$ (mm), em que o valor de e depende essencialmente do tipo de espessura que se encontra em estudo. Assim sendo, optou-se por fazer variar apenas as espessuras das amostras e o seu acabamento superficial. A gama de valores desta espessura (e) variou entre dos 0,3 e os 1,0 mm para os diferentes ensaios experimentais.

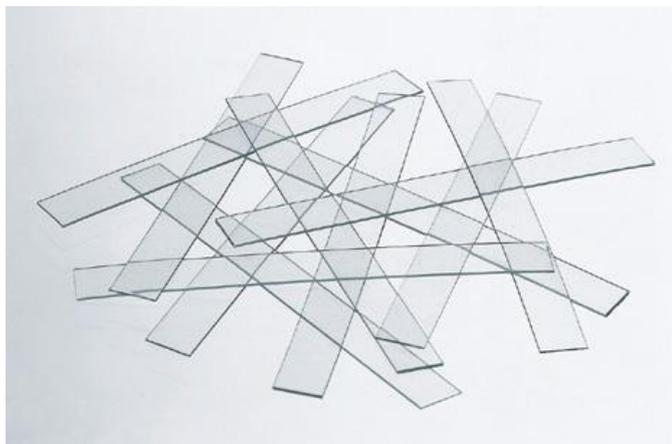


Figura 37 – Exemplificação da geometria das amostras que compõem a atividade experimental.

O material que compõe as amostras é da família dos polímeros, um acetato facilmente encontrado nas papelarias, nomeadamente mais conhecidos por folhas de acetato transparentes. Este material foi selecionado com base na rugosidade superficial que apresenta, sendo nula. Através de uma primeira medição facilmente se demonstrou que a sua rugosidade superficial deste material é a pretendida e assume valores praticamente nulos.

8.1.2. TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES

Para cada uma das amostras de ensaio é necessário submetê-las a um tratamento superficial que permite conferir uma determinada rugosidade. Esta rugosidade foi criada de duas formas distintas. Inicialmente utilizou-se um papel com uma superfície abrasiva, mais conhecido como “lixa” frequentemente utilizada para polir materiais como madeira e metais. Posteriormente pretendeu-se modificar este método e utilizou-se um sistema de jateamento de areia.

8.1.2.1. Método 1 – Superfície abrasiva

O primeiro método visa essencialmente num processo mais rudimentar, pois tudo é feito em base de valores predefinidos e sem grande controlo nas variáveis utilizadas. Cada uma das amostras é submetida a uma prensagem, com auxílio de um macaco hidráulico, entre a lixa e a respetiva amostra. É utilizada sempre a mesma carga de pressão para todo o procedimento deste método. Essa carga situa-se nos 10kg/f.

O tempo de estágio da amostra na prensa é sensivelmente de 2 segundos. Assim tenta-se maximizar a padronização da técnica de introdução da rugosidade. Com a pressão criada entre a amostra e a superfície rugosa, permite que a amostra adquira a forma da lixa por contacto, dessa forma conseguem-se diferentes valores das superfícies variando a superfície da lixa.



Figura 38 – Prensa hidráulica.



Figura 39 – Substratos de superfícies abrasivas, lixas.

No quadro seguinte, pode-se verificar qual o tipo de superfícies utilizada, de acordo com a nomenclatura da sua granulação, que se refere ao número de grãos por centímetro quadrado, quanto maior a granulação mais fina esta é.

Tabela 15 – Granulação dos substratos utilizados para criarem rugosidade.

Lixa	Especificação/Utilização
P120	Média – de utilização geral em madeiras.
P60	Grossa – utilizada em remoção de oxidações de metais ou para áreas com pinturas de difícil remoção.
P40	Extremamente grossa, com grande capacidade de desbaste.

Posteriormente, no capítulo da medição das rugosidades, são conhecidos os valores de rugosidade que estas superfícies incutem nas amostras de acetato.

8.1.1.1. Método 2 – Jateamento de areia

Outro método utilizado para incutir uma superfície rugosa nas amostras foi o jateamento de areia. É uma operação de tratamento de superfícies que consiste em impulsionar um fluxo de material abrasivo (areia) contra uma superfície, de maneira a erodir e a tornar rugosa uma superfície lisa. O meio propulsor utilizado é o ar comprimido.

Com diferentes granulometrias de areia é possível criar diferentes texturas nas superfícies. Mantendo sempre os outros parâmetros do processo, a velocidade e pressão da máquina.

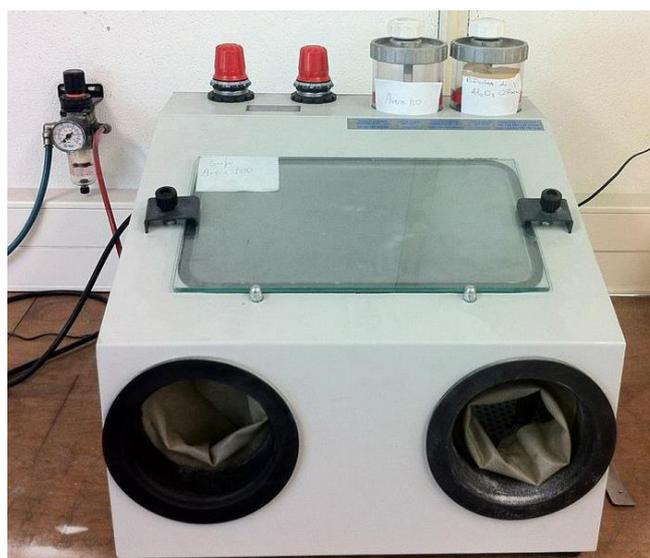


Figura 40 – Equipamento de jateamento em areia.

O quadro seguinte apresenta a terminologia aplicada aos diferentes níveis de grão utilizados, de forma a manter uma uniformidade na avaliação da rugosidade. Existem duas granulometrias de areia, mas para obter um outro parâmetro de rugosidade utilizou-se o grão R100 a diferentes pressões 2 bar e 6 bar respetivamente.

Tabela 16 – Especificação do tamanho de grão.

Tipo de grão	Especificação/Utilização
R100-2	Grão R100 aplicado por jateamento de areia com pressão de 2 bar.
R100-6	Grão R100 aplicado por jateamento de areia com pressão de 6 bar.
R30	Grão mais grosso aplicado a 2 bar.

Posteriormente, nos capítulos seguintes, consegue-se ter a informação precisa desta terminologia criada em torno dos valores de rugosidades medidos através do rugosímetro.

Depois de caracterizadas as amostras e obtidas as devidas superfícies pretendidas é altura de efetuar a sua montagem e organização para que posteriormente sejam fundidas.

8.2. Processamento experimental

A aptidão para produzir secções finas é um atributo muito importante e bastante procurado pelos projetistas. Pois percebe-se que é uma excelente solução para minimizar o peso dos componentes ou para criar ótimas condições de transferência de calor. A produção de tais secções não é caracterizada pela sua simplicidade, devido aos fatores que esta depende, o que é necessário otimizar um processo de fundição que contenha uma referência de ordem económica bem como de precisão. São comumente conhecidos como a capacidade de produzir detalhes finos. No entanto só o bom desempenho de um engenheiro juntamente com o conhecimento dos parâmetros intervenientes nos processos de fundição de precisão podem permitir atingir os limites de otimização ideais.

A expectativa final de uma peça fundida é que esta cumpra as exigências inicialmente requeridas, se for controlado o fator de contração metálica devido à solidificação e esteja livre de porosidades ou gases ou outro tipo de defeitos da fundição basta para que a peça fundida seja denominada como “uma peça sã”.

O vazamento pode ser efetuado com pressão e vácuo de forma a garantir o enchimento completo das cavidades. A natureza do material da moldação aumenta a vazabilidade das ligas o que permite a obtenção de secções finas.

8.2.1. MOLDE DE CERA

Para inicializar o processo de fabrico de fundição, primeiramente é necessário elaborar um elemento que se comporta como um molde. Elemento, que neste tipo de processo de fabrico, é designado como “árvore de cera”, este molde é constituído por um conjunto de amostras divididas em diferentes posições no cacho às quais são ligadas ao elemento de enchimento que se encontra na vertical – canal de enchimento. Assim consegue-se obter no mesmo ensaio diferentes comportamentos do fluido de acordo com a superfície de cada uma das amostras.

A árvore de cera é constituída por amostras ligadas ao cacho por meio de uma soldadura própria, efetuada manualmente com auxílio de ferramentas de posicionamento de forma a minimizar os possíveis erros humanos que podem ocorrer naturalmente.

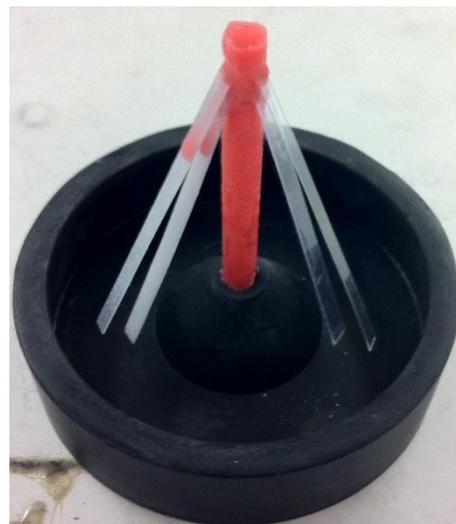
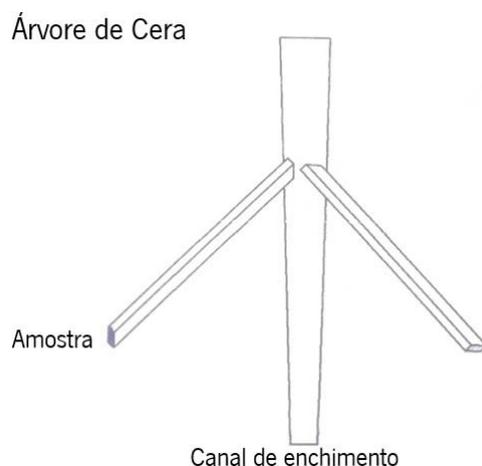


Figura 41 – Árvore de cera construída com diferentes disposições das amostras.

Cada uma das configurações implementadas é desenvolvida no capítulo de análise de resultados experimentais. Assim desta forma consegue-se estudar cada um do posicionamento das amostras de acordo com o seu parâmetro de tratamento superficial.

8.2.2. MOLDAÇÃO

Como foi referido inicialmente, o processo utilizado neste projeto é a fundição com base numa moldação em gesso – moldação cerâmica. No processo convencional, o gesso é misturado com água para produzir uma pasta que é vazada em cima de um modelo permanente colocado no interior de um aro da caixa de moldação. Após se obter o molde, em contacto com o ar, a moldação é levada para a estufa a uma temperatura superior a 160°C, para remover toda a água livre ou combinada quimicamente antes de se vazarem a liga metálica na moldação. Este processo produz uma moldação resistente mas ao mesmo tempo impermeável.

Assim sendo o processo de conceção da moldação é realizada de forma simples, mas deve conter fases importantes que necessitam ser descritas e estudadas com determinado pormenor. Estas fases encontram-se sequencialmente descritas nos subtópicos seguintes.

8.2.2.1. Estrutura - Chassis

É o nome pelo qual é conhecido a estrutura que contém o molde (árvore de cera) e vai ser vazado o gesso em líquido de forma a que o gesso solidifique e permita formar as cavidades no seu interior. Esta estrutura é colocada após a conclusão da árvore criada em cera. É depois envolvida em papel de jornal para que no vazamento do gesso garanta uma estanqueidade mínima. Na figura seguinte é possível observar o conjunto chassis-árvore montado.

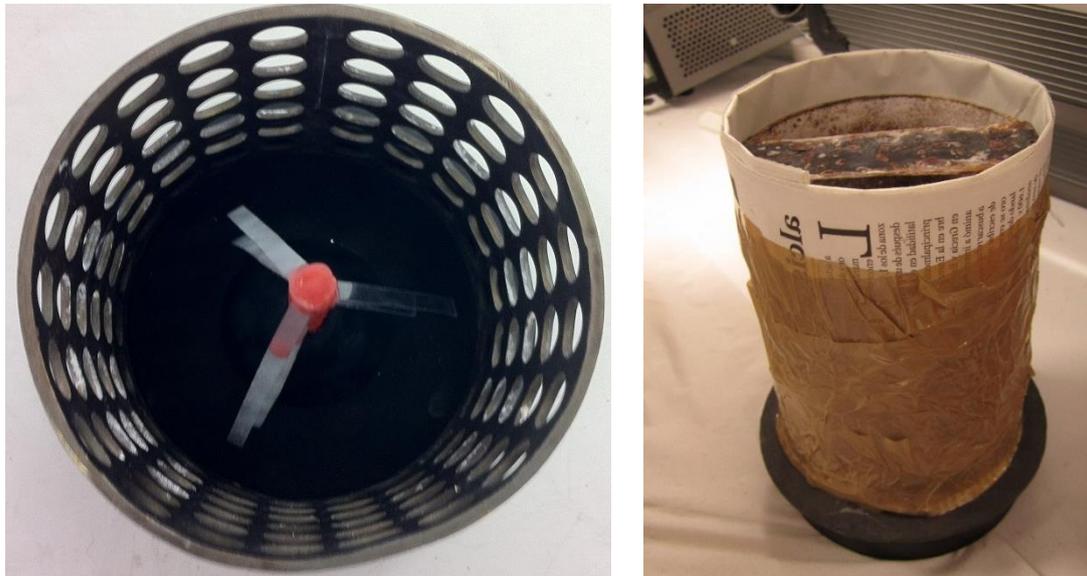


Figura 42 – Construção da estrutura da moldação, contém a árvore de cera e o chassis.

8.2.2.2. Gesso

Tratando-se de um processo de fundição em moldação cerâmica, com moldes perdidos o que indica que cada moldação efetuada serve apenas para a obtenção de uma única peça vazada, o gesso de Paris é misturado com água para produzir a pasta que é vazada no interior da moldação. O gesso de Paris é um hemi-hidrato e é produzido por calcinação do di-hidrato a temperaturas de 128°C. Na prática é necessário acrescentar 40% de água ao gesso, para se obter a estrutura da moldação. Em todos os ensaios realizados o valor da quantidade da mistura permaneceu constante, sendo que se utilizou 1500g de gesso para cada 600g de água.



Figura 43 – Preparação do gesso de paris para posteriormente ser introduzido na estrutura da moldação.

Colocadas as quantidades certas da mistura é necessário proceder a uma agitação para que ambas se possam homogeneizar no recipiente e ainda eliminar as pequenas partículas presentes. Esta etapa é realizada com recurso a um agitador mecânico.

Ainda assim as moldações devem ser cheias em condições de vácuo ou de baixa pressurização (1bar) para assegurar um enchimento completo das espessuras mais finas das amostras. Como não existe equipamento para tal é necessário improvisar, assim com o auxílio de uma máquina de vácuo presente na seguinte imagem, consegue-se retirar o oxigénio presente no interior do recipiente da pasta. Uma operação que demora normalmente cerca de 120 segundos a concluir.



Figura 44 – Equipamento responsável por garantir o vácuo e pressurização do gesso.



Figura 45 – Gesso de paris a ser introduzido na estrutura de moldação.

Posto isto é necessário verter a pasta para o interior do chassis da moldação, para que assim se proceda a uma nova operação na máquina de vácuo que demora 90 segundos a realizar.

Concluídas estas operações é necessário proceder á solidificação natural do gesso. Os chassis de moldação são colocados numa base horizontal e durante duas horas ficam imobilizados nas condições normais de temperatura e humidade.

8.2.2.3. *Ciclo térmico*

Depois de efetuado o tempo de repouso do gesso (2 horas), é altura de submeter o conjunto do molde a um tratamento térmico de forma a conferir as devidas propriedades mecânicas ao mesmo. Este processamento visa essencialmente eliminar os resíduos de cera que permaneceram no interior da moldação. O ciclo a adotar depende sobretudo do material cerâmico utilizado e do tipo de liga a vaziar.



Figura 46 – Forno de alta resistência mais conhecido como mufla.

Esta operação é realizada num forno de alta resistência, conhecido como mufla, de acordo com a evolução das temperaturas apresentadas no gráfico seguinte, Figura 46.

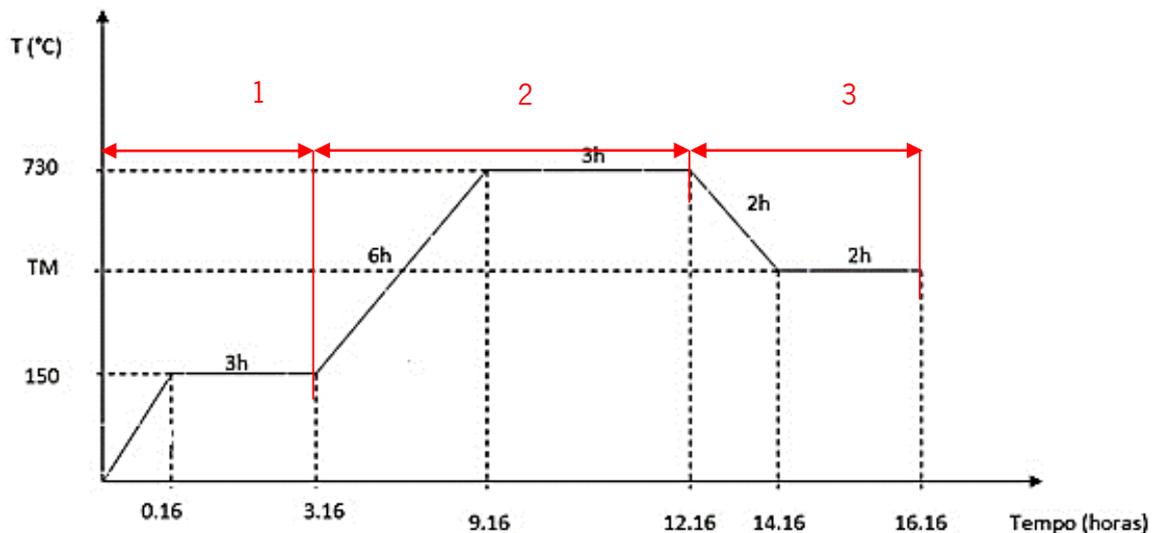


Figura 47 – Ciclo térmico da moldação com os seus respetivos estágios, realizado na mufla.

1ª Fase

Começando por analisar individualmente os estágios que se encontram numerados no gráfico, o primeiro estágio indica uma subida gradual da temperatura e posteriormente um estágio de 3 horas nessa mesma temperatura (150°C). A subida da temperatura não tem que ser efetivamente realizada num quarto de hora, depende evidentemente do tipo de forno ou da sua capacidade de aquecimento. Assim sendo o objetivo principal do primeiro estágio é eliminar a água presente na moldação e depois de atingidos os 150°C derreter o cacho de cera que se encontra no seu interior.

2ª Fase

É no segundo estágio do processamento térmico que ocorre um fator importante, a expansão térmica do molde. Esta expansão é devida ao sobreaquecimento rápido efetuado, ao qual provoca um cozimento do gesso e ainda melhora as suas propriedades mecânicas. A temperatura é elevada até aos 730°C para que o acetato soldado ao cacho de cera seja totalmente eliminado. Pois o ponto de fusão deste material poliémico situa-se na casa dos 700°C. Assim é garantido que este é eliminado e não há presença no interior da moldação de modo a não influenciar o vazamento da liga.

3ª Fase

Para garantir que não ocorra nenhum tratamento térmico que não seja pretendido é altura de baixar a temperatura. Esta diminuição é feita até à temperatura de moldação pretendida (TM). Esta temperatura de moldação depende essencialmente do tipo de liga que se pretende vaziar. No decorrer deste projeto a temperatura de moldação foi alterada ao longo dos ensaios experimentais, estando sempre o seu valor indicado. O estágio final de duas horas serve principalmente para homogeneizar a temperatura da moldação de forma a estar garantida no momento do vazamento da liga.

8.2.3. MATERIAL

Para os ensaios experimentais são selecionados dois tipos de liga. O alumínio (Al), numa liga A356 e o cobre-estanho (CuSn).

O alumínio tem um ponto de fusão normalmente situado nos 660°C, ponto ao qual foi alvo de diversas transformações. Estas ligas têm como metal base o alumínio podendo ainda ser ligadas com diferentes teores. As ligas de alumínio utilizadas na fundição têm um vasto leque de aplicação devido à sua elevada resistência mecânica aliada à leveza dos componentes obtidos.

As ligas de cobre podem ter elevada percentagem de cobre ou serem ligadas com zinco ou estanho. Neste caso a ligação é realizada com um teor em estanho inferior a 9%, apresentando uma cor que passa de vermelho para o amarelo em função do seu teor em estanho.

Para maior detalhe das características de cada uma destas ligas encontra-se no *capítulo II - Estado de arte*, uma visão mais pormenorizada das respetivas ligas.

8.2.4. VAZAMENTO

O principal requisito durante esta operação é que o metal preencha totalmente as cavidades interiores da moldação, de maneira a que se reproduza a forma do molde e respetivos detalhes. Existe portanto uma relação direta com o conceito de fluidez metálica, a qual depende mais de aspetos da ordem da tecnologia do que propriamente das propriedades físicas. Existem determinados fatores que melhoram as propriedades da fluidez, entre eles estão a temperatura de vazamento, e o pré aquecimento das moldações. A composição das ligas também serve como um fator de melhoramento da fluidez, no caso de se adotar por um vazamento perto do ponto eutético. Sabe-se ainda que uma alta rugosidade das superfícies e dos canais da moldação possam melhorar a fluidez.

8.2.4.1. Equipamento

O vazamento é efetuado sob as condições ideais, pressão e vácuo, no equipamento próprio. Este equipamento é o apresentado na imagem a seguir, Indutherm VC-400, é caracterizado por ser um dispositivo de fundição por indução. O seu gerador de indução garante um rápido aquecimento, assim como uma intensa mistura dos metais.



Características:

- Potência: 3,5 KW - 120v Monofásica
- Capacidade do cadinho: 2kgs
- 16 Programas de Temperatura
- Frascos com flange
- Frascos: 130x260 (diâmetro x alt.)
- Baixa Frequência
- Mistura Automática dos Metais
- Dimensões: 500 x 760 x 1450 mm

Figura 48 – Cadinho utilizado nas atividades experimentais e respectivas características, Indutherm VC-400.

Este equipamento utiliza uma câmara de fusão que utiliza um gás inerte, árgon de forma a evitar a oxidação indesejada ou a formação de inclusões durante a fusão, particularmente importante quando se molda ouro ou prata. Outra característica importante na realização dos ensaios, é a fundição sob pressão. Este equipamento permite definir uma pressão na câmara de maneira a que o vazamento ocorra com elevada precisão.

8.2.4.2. Condições de ensaio

Realizaram-se no total 14 ensaios de vazamento, sendo que uma parte foi efetuada para o material de cobre estanho e a outra metade em alumínio. A ideia principal era utilizar sempre as mesmas condições de pressão e vácuo para a totalidade das amostras e esse objetivo foi cumprido. Em todos os vazamentos efetuados a pressão foi mantida como uma constante, 0,8 bar. Para se perceber a tendência do vazamento de amostras de espessura reduzida como o enchimento de todas as cavidades do molde

optou-se por encontrar um ponto de equilíbrio ao longo dos ensaios. Este ponto de equilíbrio relaciona-se essencialmente com as temperaturas a que o molde é aquecido, a temperatura de moldação e a temperatura de vazamento. Sabe-se que dependendo do material o preenchimento total das cavidades moldantes tendem a ser diferentes.

A ideia é numerar todos os ensaios e apresentar um quadro síntese que permita identificar as suas variáveis de vazamento. Como foi dito as variáveis são essencialmente identificadas pelas temperaturas de moldação, T_m e ainda pela temperatura de vazamento T_v .

Tabela 17 – Quadro resumo das atividades realizadas ao longo do projeto.

Ensaio	#1		#2		#3		#4		#5		#6		#7	
	CuSn	Al												
T_m (°C)	540	350	540	350	540	300	540	200	540	300	540	300	400	300
T_v (°C)	1075	635	1075	635	1075	635	1075	635	1075	600	1075	600	1075	600

Embora tenham sido realizados todos estes ensaios, não se procederá á sua análise detalhada. Pelo que esta análise será efetuada apenas para os ensaios que apresentem uma clarividência mais evidente em termos de conformidade apresentada. Ou seja, o motivo pelo qual alguns ensaios não constam neste relatório deve-se principalmente á não conformidade dos mesmos. Pois estes ensaios são passíveis de conter erros que posteriormente geram novos erros presentes na análise. No subcapítulo seguinte, existe uma tabela que menciona quais foram os valores de enchimento, ou seja, a fluidez registada para cada vazamento.

8.2.5. DESMOLDAÇÃO

Apos efetuado o vazamento é altura de retirar o respetivo fundido do interior da moldação. Para tal é necessário que o conjunto moldação e gesso sejam submetidos a um período mínimo de arrefecimento (por volta dos 60s). Após este período ocorre a respetiva desmoldação que consiste em imergir em água todo conjunto da moldação, pois desta forma o gesso será desintegrado muito facilmente. Esta desintegração do gesso permite que o fundido seja retirado de forma fácil e segura dentro do interior da moldação.



Figura 49 – Ilustração de uma desmoldação de um fundido, efetuada num ensaio experimental.

8.3. Pós-processamento e Análise de resultados

Depois de exemplificada toda a metodologia de trabalho utilizada é altura de analisar com precisão e exatidão todos os dados obtidos dos processos experimentais para poder estabelecer se o projeto tende a seguir a teoria inicial ou se a rugosidade não tem influência no vazamento de peças finas. É neste capítulo que se encontram todos os dados relacionados com a atividade experimental, desde o tipo de material utilizado até à medição em *mm* do preenchimento obtido em cada ensaio.

A apresentação de resultados é numericamente ordenada pelo ensaio realizado, à qual consta os valores de rugosidade medidos através do rugosímetro e ainda um gráfico de fluidez relativamente à rugosidade. Em cada ensaio é definido o material utilizado, CuSn (Cobre Estanho) e Al (Alumínio). Apresenta-se também uma imagem digital do estado final da moldação obtida.

A fluidez é medida relativamente ao preenchimento do metal nas cavidades da moldação em gesso. Embora que a fluidez não seja assim definida, utiliza-se apenas como um termo meramente utilizado para caracterizar a profundidade que o fluido consegue atingir até solidificar.

Neste capítulo a análise mais importante incide sobre a tendência encontrada neste tipo de fundição e ainda quais os melhores resultados encontrados. Assim serão apresentados os ensaios que melhor contribuíram para a afirmação da teoria inicialmente elaborada aquando a realização deste projeto.

Os resultados considerados viáveis são apresentados num quadro síntese aos quais revelam valores para ambos os materiais testados. Todos os outros resultados encontram-se em arquivo para serem consultados posteriormente, se necessário. Neste quadro é possível perceber em detalhe as condicionantes que afetam os ensaios experimentais. Posteriormente cada um dos ensaios é comentado

e estudado de forma individual. Para tal utilizam-se ferramentas gráficas que permitem obter uma tendência encontrada. Para a discussão e conclusões será necessário efetuar uma relação e interpolação dos diferentes gráficos de acordo com as principais variáveis presentes no ensaio.

8.3.1. LIGA DE ALUMINIO

Neste subcapítulo apresenta-se um resumo das condicionantes envolvidas para os ensaios experimentais da liga de alumínio, tal como se pode observar através da Tabela 18. Cada um dos estudos é detalhado de acordo com os níveis de rugosidade, a aparência do fluido e os resultados que são obtidos.

Tabela 18 – Quadro resumo da atividade experimental dos ensaios realizados para a liga de alumínio.

Condições Ensaio - Alumínio (Al)						
Ensaio	Variáveis Fundido (°C)	Espessura amostra (mm)	Níveis de Rugosidade Ra_{med} (μm)			
#1	$T_m = 350$ $T_v = 635$	$e = 0,7$ $e = 1$	3,15	3,93	5,05	5,20
#4	$T_m = 200$ $T_v = 635$	$e = 0,5$ $e = 0,7$ $e = 1$	0,02	2,83	3,00	3,12
#6	$T_m = 300$ $T_v = 600$	$e = 0,3$ $e = 0,6$ $e = 9$	0,02	3,00		3,12
#8	$T_m = 300$ $T_v = 580$	$e = 0,3$	0,06	2,69		3

8.3.1.1. Ensaio #1

O primeiro ensaio experimental, no que concerne à liga de alumínio, foi realizado de acordo com as seguintes condições apresentadas na Tabela 18. O molde de gesso foi submetido ao respetivo tratamento térmico que se encontra detalhado na Figura 47. A temperatura de moldação foi confinada nos 350°C e a temperatura que ocorreu o vazamento nos 635°C.

Os valores de rugosidade medidos através do equipamento apropriado estão apresentados no quadro seguinte para cada um dos padrões de granulação anteriormente explicada.

Tabela 19 – Valores de rugosidade registados para o primeiro ensaio.

		S/Rugosidade	P120	P60	P40
<i>e</i> (mm)	0,7	3,4	3,75	4,2	5,1
	1	2,9	4,1	5,9	5,3
<i>Ra_{med}</i> (μm)		3,15	3,93	5,05	5,20
<i>Desvio Padrão</i> (σ)		0,22	0,15	1,01	0,76

O fundido obtido pode ser visualizado através da seguinte imagem, apresentada na Figura 50.



Figura 50 – Fundido obtido no primeiro ensaio experimental da liga de alumínio.

Numa primeira análise percebe-se facilmente que as cavidades moldantes foram totalmente preenchidas por parte do metal. Assim sendo o fundido obtido está praticamente conforme o molde efetuado. Embora por um lado seja um fator positivo, pois confirma que as condições de vazamento optadas são as ideais, por outro lado não é um resultado muito favorável a ter em conta neste projeto. Pois o que realmente importa é perceber como a rugosidade influencia a fluidez. Ou seja, se não obtivermos fundidos que na gíria são definidos como fracos ou insuficientes, não se consegue perceber a tendência que a rugosidade pode seguir.

Com base nas medições efetuadas elaborou-se um gráfico que permite perceber melhor esta ideia. Para diferentes níveis de rugosidade deveríamos ter diferentes níveis de preenchimento das cavidades moldantes. O que neste caso não acontece pois todas as cavidades estão com a mesma dimensão de preenchimento de metal.

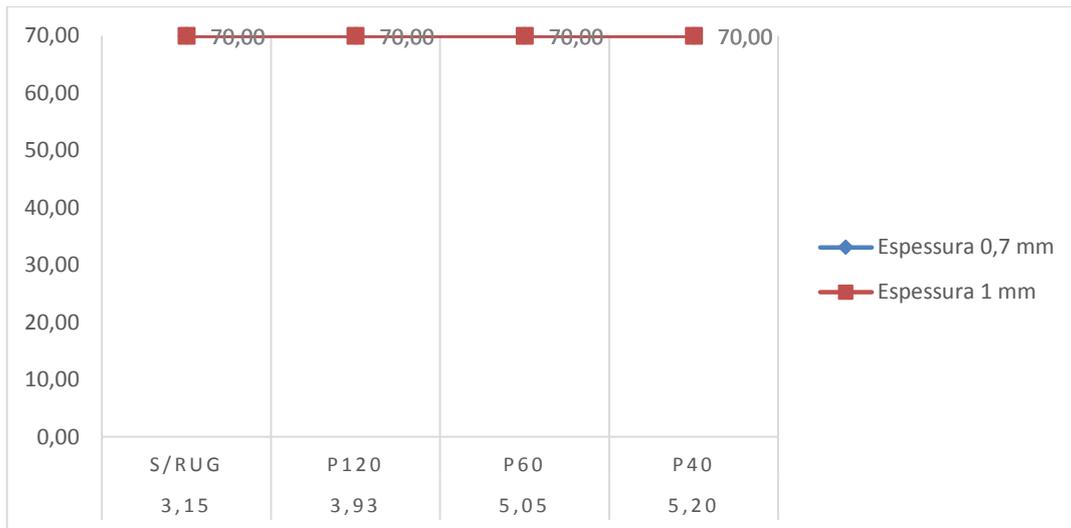


Figura 51 – Gráfico da relação fluidez/rugosidade da primeira atividade experimental para a liga de alumínio.

8.3.1.2. Ensaio #4

Seguindo-se o segundo ensaio desta atividade experimental, após análise de um primeiro ensaio menos importante, opta-se por baixar a temperatura de moldação para os 200°C mantendo constante a temperatura de vazamento da liga nos 635°C.

Relativamente ao ensaio anterior, modificou-se o tipo de tratamento de superfícies, utilizando o método 2 – Jateamento de areia para se criar as superfícies rugosas nas amostras do ensaio. Introduziu-se também mais um nível de espessura relativamente ao ensaio anterior. Seguem-se então os valores de rugosidade registados para cada amostra ensaiada bem como o respetivo valor de espessura.

Tabela 20 – Valores de rugosidade registados para o segundo ensaio.

		S/Rugosidade	R100-2	R100-6	R30
<i>e</i> (mm)	0,5	0,06	3,21	3	2,69
	0,7	0	3,11	3	3,1
	1	0	2,16	3	3,57
<i>Ra_{med}</i> (μm)		0,02	2,83	3,00	3,12
<i>Desvio Padrão</i> (σ)		0,22	0,15	1,01	0,76

O resultado físico deste ensaio experimental pode ser verificado através da análise da seguinte figura, Figura 52.



Figura 52 - Fundido obtido no segundo ensaio experimental da liga de alumínio.

De acordo com uma primeira observação, verifica-se quase a mesma ocorrência do ensaio anterior, a maioria das cavidades moldantes estão preenchidas na totalidade. Embora se tenha baixado a temperatura de moldação para que o metal não se integrasse na totalidade da cavidade, o mesmo não aconteceu como o esperado. Para se perceber melhor o comportamento elaborou-se um gráfico que determina a relação da fluidez com a rugosidade.

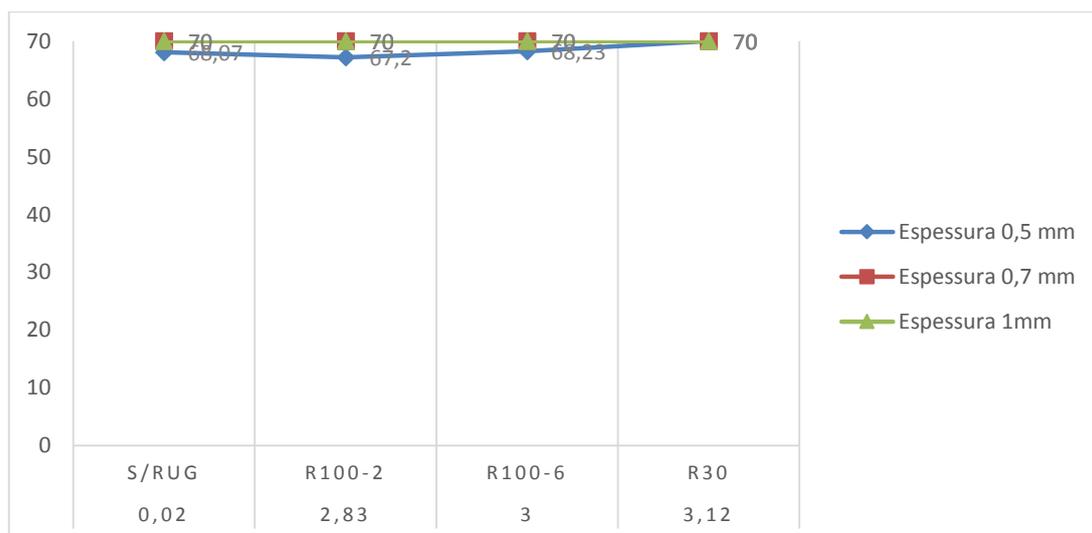


Figura 53 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da segunda atividade experimental para a liga de alumínio.

De acordo com o Ra_{med} e os valores apresentados no gráfico da Figura 53, já se percebe o principal objetivo deste projeto, verificar a influência que a rugosidade apresenta na fluidez do metal em vazamentos de pequenas espessuras. É notório que para espessuras de 0,7mm e 1mm não existe grande hipótese para tecer comentários relativamente à influência da rugosidade, visto que as cavidades foram totalmente preenchidas. Já para a espessura de 0,5mm percebe-se que existe uma determinada influência. Em que para o fundido da amostra sem rugosidade o enchimento não ocorre na totalidade. À medida que existe rugosidade superficial na amostra a fluidez tende a subir para valores máximos, como acontece para os valores máximos de rugosidade.

8.3.1.3. Ensaio #6

De acordo com os resultados obtidos até agora percebe-se que baixando a espessura da amostra a análise tende a ser mais exata, pois o enchimento das cavidades não se obtém na totalidade. Assim sendo o próximo passo é recorrer a espessuras mais baixas e realizar novos ensaios para temperaturas de moldação e vazamento recomendadas. Utiliza-se a temperatura de moldação um pouco abaixo da inicial, nos 300°C e a respetiva temperatura de vazamento nos 600°C.

Para valores de rugosidade verificou-se no ensaio anterior que a obtenção das superfícies rugosas nas amostras através do método 2 – jateamento de areia, existe uma proximidade de valores para o R100-2 e o R100-6. Assim opta-se por apenas utilizar um deles, R100-6, visto que não se consegue diferenciar as diferentes pressões do equipamento de jateamento de areia. Os valores de rugosidade são então apresentados no seguinte quadro, Tabela 21.

Tabela 21 - Valores de rugosidade registados para o terceiro ensaio.

		S/Rugosidade	R100-6	R30
$e(\text{mm})$	0,3	0,06	3	2,69
	0,6	0	3	3,1
	0,9	0	3	3,57
$Ra_{med} (\mu\text{m})$		0,02	3,00	3,12
$Desvio\ Padr\tilde{a}o (\sigma)$		0,03	0,00	0,36

Pode-se observar o resultado obtido através da visualização da imagem seguinte, Figura 54.



Figura 54 - Fundido obtido no terceiro ensaio experimental da liga de alumínio.

A Figura 54 revela alguma informação importante, de acordo com o que se pretende, visualiza-se que não se obteve um fundido com as cavidades totalmente preenchidas. Apesar de ser um fator negativo, quando se fala em fundição, neste caso é positivo pois pretende-se estudar o efeito da rugosidade na fluidez, se o fundido estiver totalmente preenchido não se verifica influência pois há uma uniformidade de valores.

Após efetuada uma medição da dimensão do preenchimento do metal consegue-se construir um gráfico, Figura 55, que permite visualizar o que é explicado em palavras.

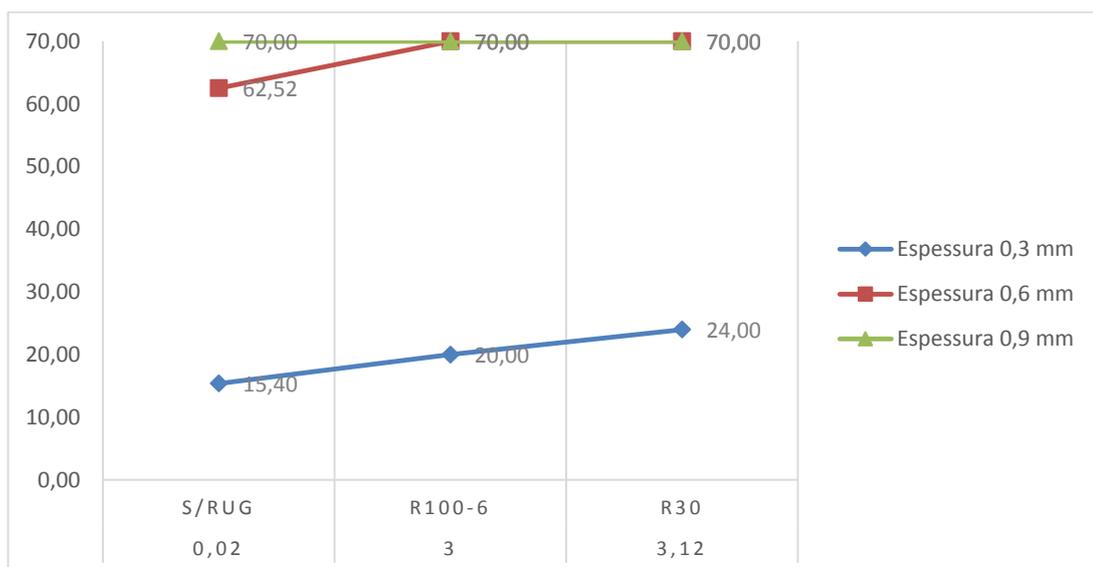


Figura 55 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da terceira atividade experimental para a liga de alumínio.

Analisando então o respectivo gráfico, Figura 55, que representa o comportamento da fluidez relativamente à rugosidade superficial das amostras, verifica-se que este segue a tendência esperada. Quanto menor a espessura das amostras melhor o resultado esperado. Resultado esperado esse que define que quanto maior for o nível de rugosidade melhor o fluido circula no interior das cavidades moldantes. De acordo com o princípio teórico que constitui a principal motivação encontrada no projeto. Apenas o resultado da fluidez para a espessura de 0,9mm não correu como o desejado, mas isso só vem confirmar a teoria de que a influência da rugosidade é para valores de espessura relativamente baixos.

8.3.1.4. Ensaio #7

Depois obtidos os resultados acima apresentados, é altura de perceber que o foco deste projeto faz sentido para espessuras reduzidas. Sendo assim é altura de validar a teoria até agora assegurada, procurando obter a mesma linha de tendência da fluidez, em que aumentando a rugosidade a fluidez do metal tende a ser melhorada. Neste ensaio a espessura utilizada é restringida a 0,3mm, optando assim por fazer dois ensaios em simultâneo desta mesma espessura de modo a validar o ensaio. A temperatura de moldação continua nos 300 °C e a temperatura de vazamento baixa para os 580°C, relativamente ao ensaio anterior.

Tabela 22 - Valores de rugosidade registados para o quarto ensaio.

		S/Rugosidade	R100-6	R30
e(mm)	0,3 A	0,06	3	2,83
	0,3 B	0	3	2,55
<i>Ra_{med}</i> (μm)		0,03	3,00	2,69
<i>Desvio Padrão</i> (σ)		0,03	0,00	0,11

De acordo com a Tabela 22, verifica-se que são realizados dois ensaios com a mesma espessura (0,3mm). Outro fator a ressaltar relaciona-se com a rugosidade, através das medições das superfícies das amostras verifica-se que a maior rugosidade não é R30 mas sim R100-6.

Assim sendo, de acordo com a Figura 56, o fundido obtido tem o seguinte aspeto.



Figura 56 - Fundido obtido no quarto ensaio experimental da liga de alumínio.

Observando então a figura apresentada deste fundido, percebe-se que decorreu como o esperado. Ou seja, as cavidades não são totalmente preenchidas, fenómeno que permite estudar a influência que os níveis de rugosidade têm na fluidez do metal. Com a medição da dimensão do preenchimento pode avaliar se melhor tal influencia. Estes valores podem ser consultados através da Figura 57, onde existe um gráfico que ilustra bem os resultados obtidos deste ensaio.

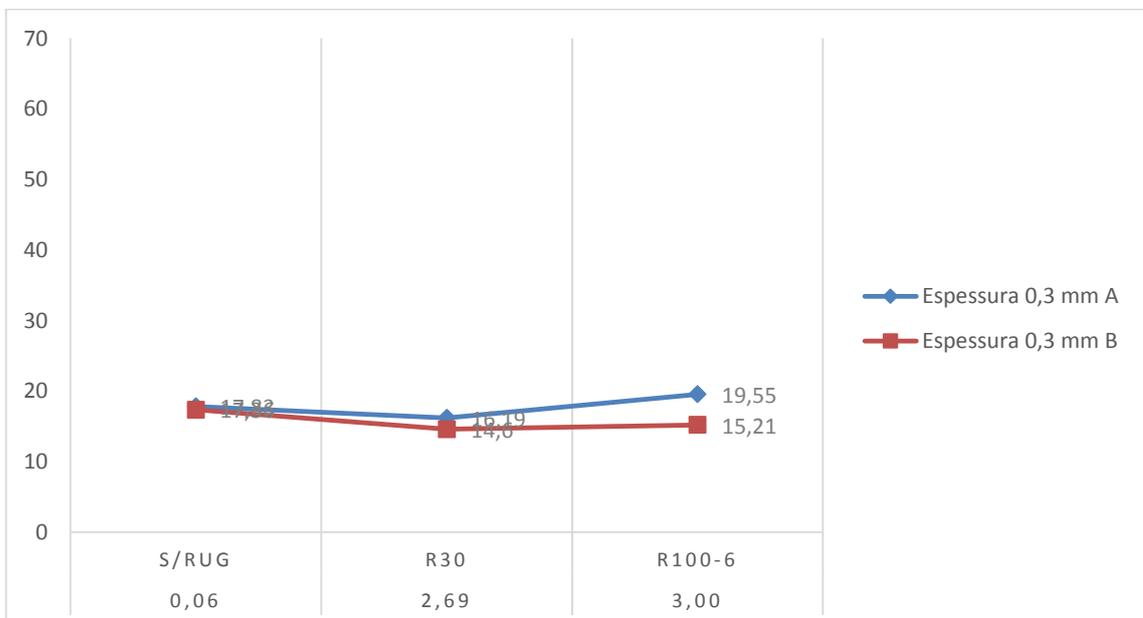


Figura 57 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da quarta atividade experimental para a liga de alumínio.

Analisando o gráfico acima apresentado, Figura 57, identifica-se que este não foi o resultado mais esperado. Ainda assim adicionando uma linha de tendência exponencial ao gráfico nota-se que a fluidez sobe à medida que a rugosidade é maior. Isto para o caso do ensaio A.

No caso do ensaio B, não se verifica a mesma tendência positiva mas sim o inverso. Pois à medida que aumenta a rugosidade, a fluidez tende a diminuir.

8.3.2. LIGA DE COBRE ESTANHO

A segunda liga a utilizar foi uma fusão de duas ligas, a de cobre com a de estanho. Tratando-se de um estudo que visa a proximidade com a liga de ouro, é necessário recorrer a um material que contenha propriedades semelhantes. Existe uma tabela, Tabela 23, que identifica as condicionantes de cada ensaio experimental, bem como será pormenorizado a sua discussão de resultados nos capítulos adjacentes.

Tabela 23 - Quadro resumo da atividade experimental dos ensaios realizados para a liga de cobre estanho.

Condições Ensaio – Cobre Estanho (CuSn)						
Ensaio	Variáveis Fundido (°C)	Espessura amostra (mm)	Níveis de Rugosidade Ra_{med} (μm)			
#1	$T_m = 540$ $T_v = 1075$	$e = 0,7$ $e = 1$	3,15	3,93	5,05	5,20
#4	$T_m = 540$ $T_v = 1075$	$e = 0,5$ $e = 0,7$ $e = 1$	0,02	2,83	3,00	3,12
#6	$T_m = 540$ $T_v = 1075$	$e = 0,3$ $e = 0,6$ $e = 9$	0,02	3,00		3,12
#7	$T_m = 400$ $T_v = 1075$	$e = 0,3$	0,06	2,69		3

8.3.2.1. Ensaio #1

As condições de tratamento de superfícies foram iguais para ambos os materiais, da mesma forma do alumínio, apresenta-se no seguinte quadro, Tabela 19, onde se pode consultar os valores de rugosidade medidos nas amostras de acetato que serviram para criar uma cavidade moldante no interior do molde. Este tratamento de superfície utilizou como processo de obtenção, o método 1 – superfície abrasiva.

De acordo com as temperaturas do ensaio, estas diferem obviamente da liga de alumínio. Começando por aquecer o molde, com o respetivo ciclo térmico (Figura 47), a temperatura de moldação fica pelos 540 °C. No que concerne ao vazamento do metal opta-se por utilizar os 1075°C para submeter o material para o interior da moldação.

Tabela 24 – Valores de rugosidade registados para o primeiro ensaio.

		S/Rugosidade	P120	P60	P40
<i>e</i> (mm)	0,7	3,4	3,75	4,2	5,1
	1	2,9	4,1	5,9	5,3
<i>Ra_{med}</i> (μm)		3,15	3,93	5,05	5,20
<i>Desvio Padrão</i> (σ)		0,22	0,15	1,01	0,76

O resultado do fundido pode ser observado através da figura abaixo apresentada, Figura 58.



Figura 58 - Fundido obtido no primeiro ensaio experimental da liga de cobre estanho.

Consciente da forma como esta liga é fundida, percebe-se facilmente que as cavidades moldantes não foram totalmente preenchidas por parte do metal líquido. Uma outra observação mais pormenorizada indica que a bacia de enchimento não ficou representada, pois ocorreu uma rutura no topo do canal de enchimento ao efetuar a operação de desmoldação.

Na altura das medições do enchimento do metal, percebe-se como se comportam as espessuras de acordo com a rugosidade e a fluidez do metal. Este estudo pode ser efetuado com o auxílio de um gráfico, em baixo apresentado, Figura 59.

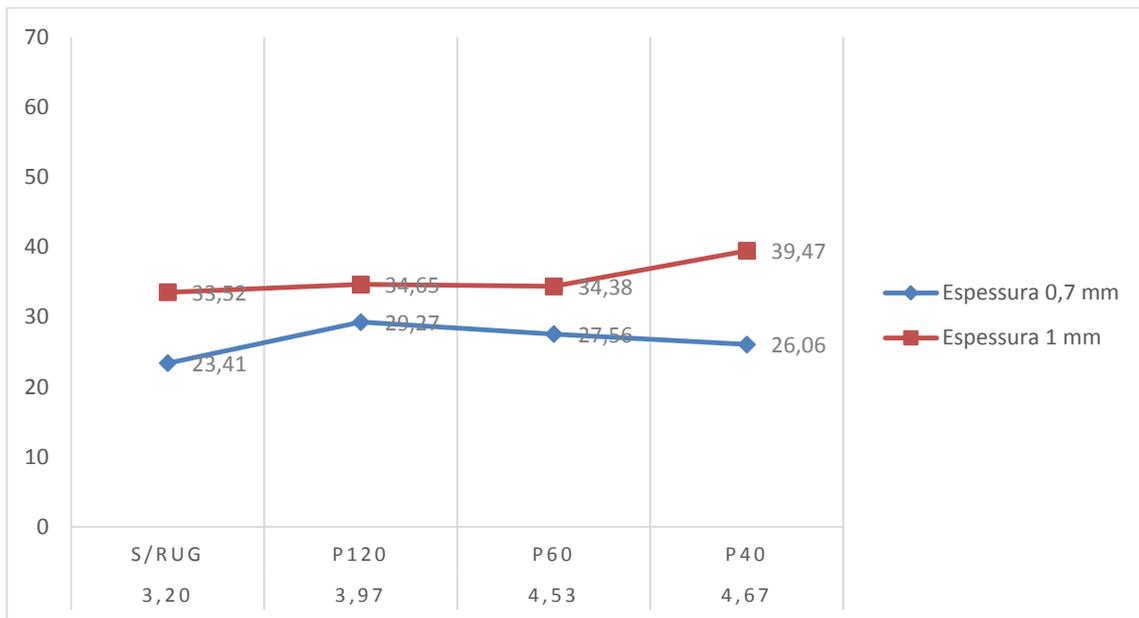


Figura 59 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da primeira atividade experimental para a liga de cobre estanho.

Avaliando o respetivo gráfico, Figura 59, que contempla as informações adquiridas no ensaio, verifica-se que existe uma tendência para que a fluidez aumente ao longo do crescimento da rugosidade. O enchimento das cavidades do molde foi maior no caso das amostras com espessura maior, 1mm. Neste caso denota-se uma evolução da fluidez quando a rugosidade é máxima, para $4,67\mu\text{m}$. No caso da amostra com 0,7mm de espessura denota-se que existiu um primeiro crescimento da fluidez no primeiro intervalo de rugosidade e de seguida um ligeiro decréscimo ate atingir o ultimo valor.

Numa avaliação global, indica-se que o principio defendido desde o início, em que a fluidez aumenta para níveis de rugosidade superiores, volta a confirmar-se na prática. Embora que este pode assumir comportamentos diferentes para diferentes valores de espessuras utilizados.

8.3.2.2. Ensaio #4

O segundo ensaio experimental realizado para a liga de cobre estanho, foi realizado nas mesmas condições que o primeiro, diferindo apenas no método do tratamento de superfícies e ainda nas espessuras utilizadas. Acrescentou-se mais uma amostra com uma menor espessura (0,5mm) e a temperatura de moldação e vazamento são respetivamente 540°C e 1075°C.

Os valores do tratamento superficial de cada uma das amostras seguem no quadro seguinte, Tabela 20. O resultado do fundido deste ensaio experimental pode ser consultado através da imagem abaixo apresentada, Figura 60.

Tabela 25 – Valores de rugosidade registados para o segundo ensaio.

		S/Rugosidade	R100-2	R100-6	R30
<i>e</i> (mm)	0,5	0,06	3,21	3	2,69
	0,7	0	3,11	3	3,1
	1	0	2,16	3	3,57
<i>Ra_{med}</i> (μm)		0,02	2,83	3,00	3,12
<i>Desvio Padrão</i> (σ)		0,03	0,47	0,00	0,36



Figura 60 - Fundido obtido no segundo ensaio experimental da liga de cobre estanho.

Na análise deste fundido é necessário referir que relativamente ao ensaio anterior, este obteve uma maior dimensão de enchimento das cavidades moldantes. Enchimento esse que foi aumentando ao longo da espessura, quanto maior a espessura maior a dimensão da respetiva cavidade. De seguida efetua-se as medições das respetivas dimensões e tece-se as respetivas análises com base num gráfico que ilustra o comportamento deste ensaio.

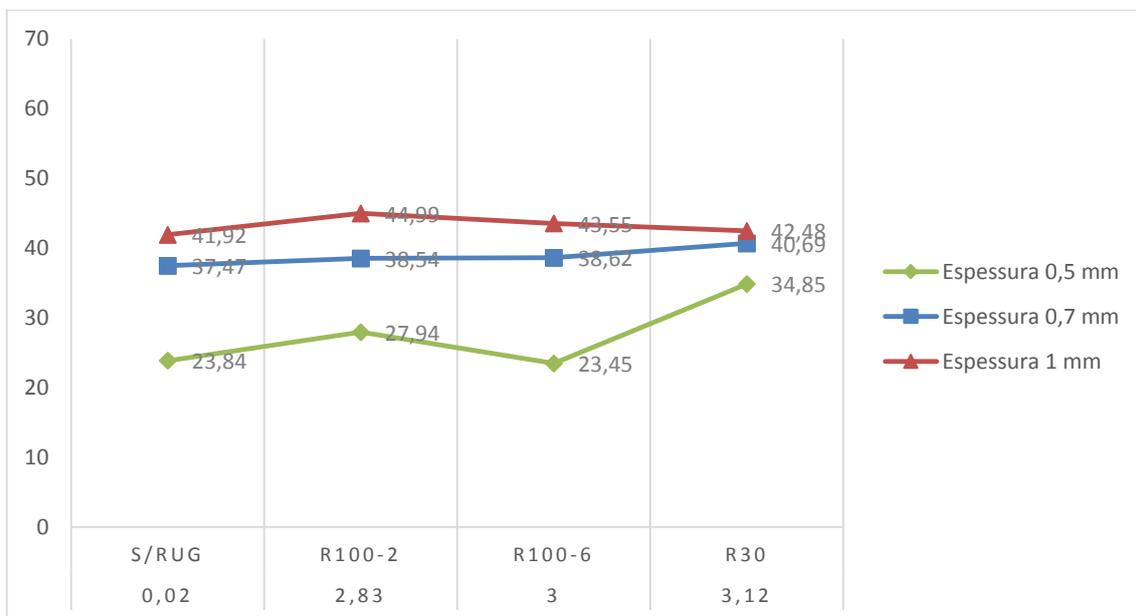


Figura 61 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da segunda atividade experimental para a liga de cobre estanho.

Começando por analisar o principal objetivo do projeto, denota-se que numa primeira visualização o objetivo é alcançado. Isto é, a fluidez do metal tende a crescer quando a rugosidade das amostras tende a aumentar. É possível identificar que a fluidez adquire valores mais altos quando se utiliza espessuras mais elevadas. O que nos indica que o importante é trabalhar nas espessuras baixas.

Para a espessura de 0,5mm verifica-se uma evolução crescente da fluidez á medida que a rugosidade da cavidade aumenta. Embora que haja uma pequena descida para o R100-6.

Para 0,7mm este crescimento, da fluidez em prol da rugosidade, também é notório ainda assim com um declive menor.

Já no caso da espessura máxima utilizada neste ensaio, 1mm, verifica-se um crescimento da fluidez quando se analisam amostras rugosas, relativamente á amostra que não contém rugosidade. Ainda assim esta diferença é substancialmente ligeira, na ordem dos 5%, relativamente ao crescimento da fluidez.

8.3.2.3. Ensaio #6

Depois de realizado o segundo ensaio para esta liga de cobre estanho, compreende-se que para se obter resultados ideais é necessário baixar um pouco a espessura das cavidades/amostras. Foi o que se fez neste terceiro ensaio, agora é possível estudar o que acontece se os valores de espessura baixarem. O método 2 – jateamento de areia, foi o método utilizado para a obtenção das superfícies rugosas. Os respectivos valores obtidos na medição apresentam-se na seguinte tabela, Tabela 21. Relativamente ao ensaio anterior foi retirado dos padrões de rugosidade o Ra_{med} do R100-2. Pois os valores medidos são bastante próximos de R100-6, ficando assim só três níveis de rugosidade para análise. No que concerne aos parâmetros do fundido estes não são alteráveis, relativamente ao ensaio anterior. Mantendo assim a temperatura de moldação nos 540°C e a temperatura de vazamento nos 1075°C.

Tabela 26 - Valores de rugosidade registados para o terceiro ensaio.

		S/Rugosidade	R100-6	R30
e(mm)	0,3	0,06	3	2,69
	0,6	0	3	3,1
	0,9	0	3	3,57
$Ra_{med} (\mu m)$		0,02	3,00	3,12
<i>Desvio Padrão (σ)</i>		0,03	0,00	0,36

De acordo com o fundido obtido podemos tecer algumas observações relativamente à sua apresentação física que se apresenta na imagem.



Figura 62 - Fundido obtido no terceiro ensaio experimental da liga de cobre estanho.

Com base na observação da figura consegue identificar-se que este fundido obteve valores substancialmente baixos para as espessuras mais reduzidas, como se pode observar na Figura 62. Outro visivelmente aparente é o facto de se verificar que a fluidez será afetada para valores reduzidos de espessura, o que uma medição da quantidade de enchimento da cavidade pode confirmar, Figura 63.

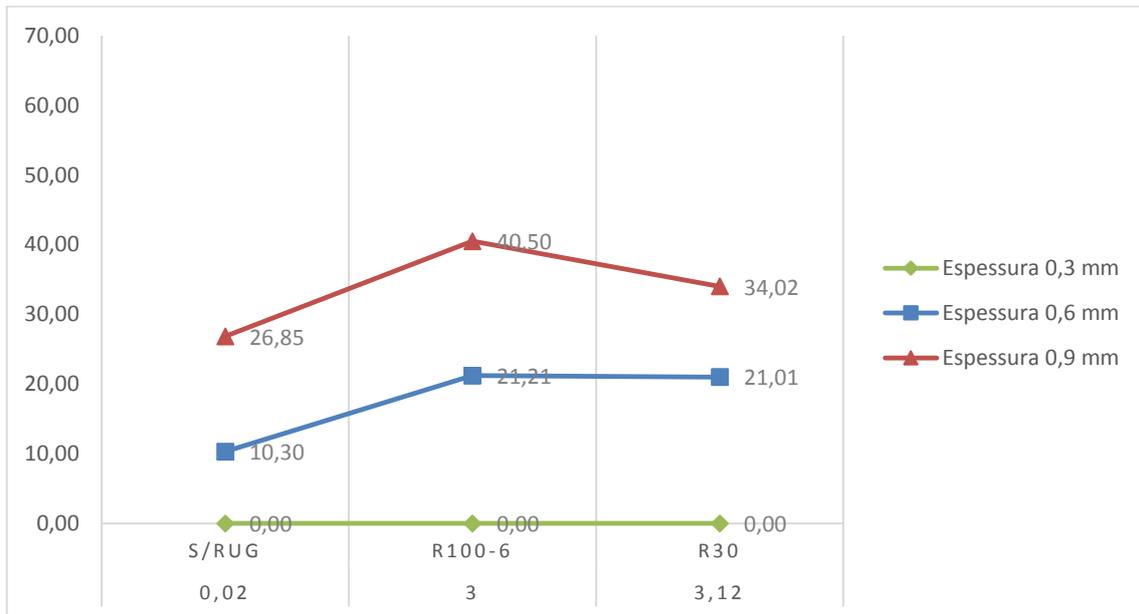


Figura 63 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da terceira atividade experimental para a liga de cobre e estanho.

De acordo com as medições elaboradas, constrói-se o gráfico apresentado acima. Pelo qual se consegue identificar o comportamento do fluido no interior da respetiva cavidade. O primeiro fator a ressaltar é que para a espessura mais baixa, de 0,3mm, não se consegue obter nenhum resultado. Pois esta espessura não foi suficiente para que o metal percorresse o seu interior.

Nas restantes espessuras o resultado obtido foi o previsto, em que a fluidez do metal tende a aumentar quando existem superfícies que contenham rugosidade. A evolução da fluidez é substancialmente alterada na espessura de 0,6mm, em que é notória a obtenção do dobro da dimensão nas amostras rugosas. Este fator acontece também para a amostra de maior espessura mas de seguida há uma queda substancial do maior nível de rugosidade (R30), embora que nunca inferior aos valores ausentes de rugosidade.

8.3.2.4. Ensaio #7

Para refinar a teoria deste projeto achou-se por bem diminuir a gama de espessura utilizada, pois os resultados obtidos para esta liga em termos da espessura mínima (0,3mm) não foram suficientemente concisos. Assim elabora-se um último ensaio que permite validar a influência da rugosidade na fluidez do metal.

Este ensaio utiliza apenas duas amostras, com dois níveis de espessura e que contem três níveis de rugosidade diferentes, de acordo com a Tabela 27. Reduzindo a espessura das amostras a dificuldade do ensaio tende a aumentar pois os parâmetros que influenciam o ensaio são maiores. Assim procurou-se ter este fator em conta e diminuiu-se um pouco a temperatura de moldação para os 400°C, relativamente aos ensaios anteriores. Quanto à temperatura de vazamento esta manteve-se inalterável, nos 1075 °C.

Tabela 27 - Valores de rugosidade registados para o quarto ensaio.

		S/Rugosidade	R100-6	R30
e(mm)	0,3	0,06	3	2,69
	0,6	0	3	3,1
<i>Ra_{med}</i> (μm)		0,03	3,00	2,90
<i>Desvio Padrão</i> (σ)		0,03	0,00	0,25

O resultado obtido do vazamento pode ser verificado pela Figura 64.



Figura 64 - Fundido obtido no quarto ensaio experimental da liga de cobre estanho.

Numa primeira visualização percebe-se que neste ensaio pouco há a avaliar, mas a verdade é que mesmo assim a tendência seguida ao longo deste projeto ficou aqui elucidada. Como se tratavam de uma repetição de dois ensaios similares, o anterior e este, o objetivo era avaliar se a tendência do ensaio anterior era confirmada. Com uma avaliação das respetivas medições efetuadas pode então tecer-se alguns princípios.

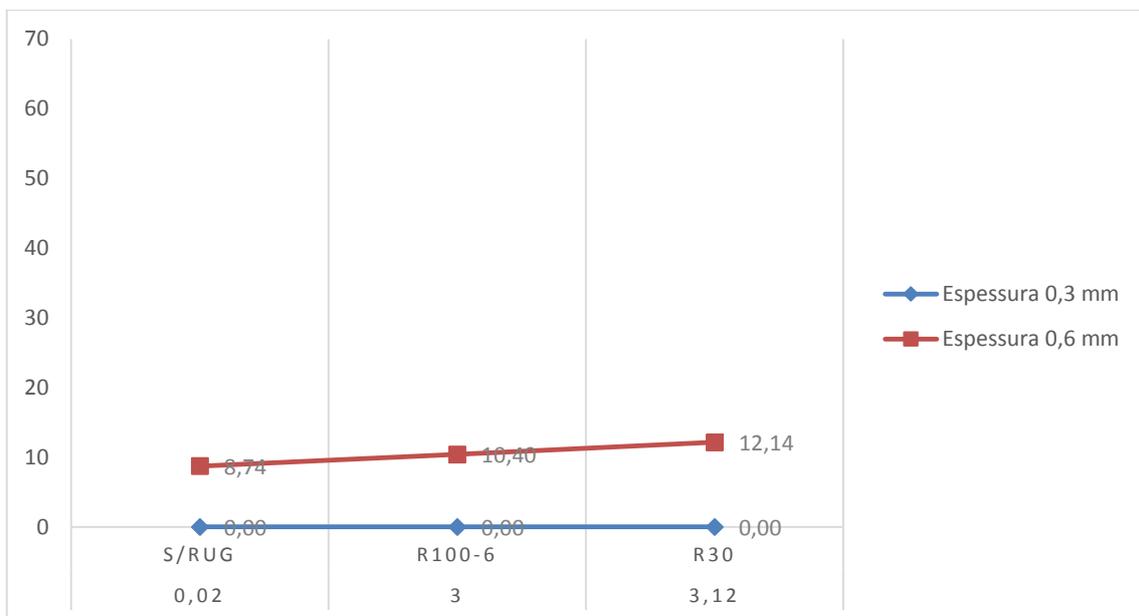


Figura 65 - Gráfico da relação fluidez/rugosidade da quarta atividade experimental para a liga de cobre estanho.

De acordo com os resultados apresentados no gráfico acima, Figura 65, verifica-se que para valores de espessura inferiores a 0,6mm não existe fluidez possível de ser avaliada. Pois o metal líquido não consegue penetrar nas cavidades moldantes e assim não nos determina como a fluidez é interpelada pela rugosidade.

No entanto consegue-se validar os dados adquiridos para a espessura de 0,6mm, em que se confirma a tendência anteriormente seguida. A fluidez tem um comportamento proporcional à rugosidade, pois à medida que se aumenta a rugosidade a fluidez do metal tende a aumentar.

8.3.3. DISCUSSÃO

Conforme a obtenção de resultados é altura de ligar algumas considerações importantes antes de se efetuar qualquer tipo de conclusão. Em ambas as ligas utilizadas se verifica uma correlação direta entre a rugosidade e a fluidez. Relação que foi confirmada também num estudo realizado, no capítulo 7.2., que estudou a relação entre rugosidade e o fenômeno da transferência de calor envolvida [21]. Ou seja, com os níveis de rugosidade que foram implementados no interior das cavidades moldantes contribuíram de forma positiva para um aumento de fluidez do material líquido no interior das mesmas. O que, tal fato, nos conduz de forma direta para as abordagens inicialmente apresentadas e contrariamente ao que é descrito num dos estudos analisados [19], percebe-se que os níveis de rugosidade criados contribuem para uma diminuição de transferência de calor. O que posteriormente contribui para uma redução da solidificação junto das paredes provocando uma maior fluidez do metal líquido. Ainda que em alguns casos esta correlação não seja tão evidente, existe sempre a tendência referida. Pois à medida que se aumentou os níveis de rugosidade criada no interior das cavidades moldantes, a fluidez registada também aumentou.

Com base na análise que determina o desvio padrão calculado, verificou-se que o método 1 – superfície abrasiva é suscetível de conter maiores irregularidades superficiais. Pois este método obteve maior dispersão de valores no capítulo do desvio padrão calculado. Também por isto que se abandonou este método no tratamento de superfícies nos ensaios seguintes.

De encontro ao que foi mencionado por Nikuradse, que os tubos com uma determinada rugosidade favorecem o escoamento do fluido [3], consegue-se confirmar esta tendência que foi estudada em 1933. Nomeadamente no capítulo que estuda o comportamento dos fluidos, que nos refere que o fluxo laminar de metal líquido prevalece no escoamento no interior das cavidades moldantes [8]. Embora não seja possível comprovar este fator, pensa-se que é realmente esta a forma como se comporta o escoamento, na altura do vazamento da liga.

A espessura foi um outro detalhe que revelou alguma importância na discussão de resultados, pois é facilmente identificável que para espessuras mais reduzidas a correlação entre rugosidade e fluidez não é tão linear. Isto pode revelar que a relação entre o valor de rugosidade e a espessura da cavidade é pequena. Pois para uma espessura de 0,3mm há uma relação de 300 μm de espessura para 3 μm de rugosidade, ou seja, a área de escoamento no interior da cavidade é bastante reduzida, o que cria grandes dificuldades ao escoamento do fluido. Pois o fluido tende a adquirir maior velocidade de escoamento, dificultando assim a correlação da rugosidade criada no interior da moldação e a fluidez.

V – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

9. CONCLUSÕES

Começando pelo objetivo principal do estudo, o efeito das estruturas rugosas no comportamento de escoamento de fluidos, consegue-se perceber melhor a forma teórica como a rugosidade pode influenciar o escoamento do metal na altura do vazamento. Partindo essencialmente de uma análise sob a forma como os elementos da natureza se comportam na presença de escoamentos em superfícies rugosas [13]. Pois o comportamento destes elementos naturais foi fundamental para adquirir as competências básicas a implementar no princípio de fundição de estruturas finas. É desta forma que se afirma a consagração primordial dos objetivos propostos inicialmente para este trabalho.

Numa primeira fase do trabalho, procurou-se encontrar mecanismos teóricos que permitissem aprovar a ideia essencial deste estudo, ou seja, encontrar na natureza uma inspiração para a existência de superfícies rugosas que influenciassem a fluidez de um determinado fluido ao longo da sua superfície. Nomeadamente verificou-se que as superfícies hidrofóbicas (flor de lótus e a pele de tubarão), foram as que melhor ressaltavam as necessidades deste trabalho. Com um levantamento do estado de arte e uma profunda busca de estudos semelhantes, verificou-se que a rugosidade é um fator que surge relacionado, quase sempre, com a transferência de calor [3]. Extraindo a ideia de que, quanto maior fossem as irregularidades presentes na superfície, menor a transferência de calor envolvida nas paredes e conseqüentemente melhor a fluidez com que o metal líquido percorre essas superfícies. Desta forma este estudo não foge ao presente, mas por sua vez relaciona a rugosidade com alguns princípios básicos da tecnologia de fabrico, nomeadamente a fundição.

Depois de fundamentada teoricamente a ideia base deste projeto, foi altura de a elucidar com uma série de experimentações práticas. Pois este é, sem dúvida, o capítulo mais importante que contempla este projeto. Utilizou-se a um dos métodos da fundição de precisão, nomeadamente a fundição em moldação cerâmica por cera perdida, como principal e único método de obtenção de estruturas finas. Os motivos de seleção deste método têm a ver sobretudo com os fatores económicos, tecnológicos e ainda com as características dos fundidos (a espessura relativamente baixa).

Neste caso o importante era obter fundidos com espessuras literalmente baixas para que se pudesse enquadrar no respetivo processo de fundição mencionado [5]. Esta meta foi atingida, pois utilizou-se uma panóplia de espessuras, nas amostras de acetato, desde os 0,3mm até 1mm, passando por determinados intervalos de compreensão.

No que respeita ao capítulo da rugosidade superficial, foram utilizados dois métodos relativamente empíricos, para a obtenção das superfícies rugosas nas amostras ensaiadas. Um dos métodos foi baseado na pressão efetuada de uma superfície bastante rugosa contra a amostra a obter. O outro método foi realizado com o auxílio de um equipamento próprio de tratamento de superfícies, mais propriamente de jateamento de areia.

Cada uma das amostras produzidas passou por uma série de critérios de rugosidade até ser definida como uma determinada saliência produzida na sua superfície. Foi utilizado somente o conceito de média aritmética, Ra_{med} , como o critério mais utilizado devido à sua simplicidade e insensibilidade de deteção de picos extremos. Estes valores foram calculados por intermédio de um equipamento designado para o efeito, um rugosímetro. As medições dos respetivos valores foram sempre elaboradas na amostra de acetato. Posteriormente foram medidos os níveis de rugosidade do fundido metálico obtido e confirmaram-se que os níveis de rugosidade seguiam a mesma tendência dos valores registados para o acetato. Os resultados obtidos pelo rugosímetro consideram-se no cômputo geral, como valores representativos de rugosidade média. Ou seja, como foi um método de obtenção um pouco intuitivo foi necessário garantir que os resultados das medições fossem devidamente concisos e ao mesmo tempo práticos. Conseguiu-se obter uma gama de rugosidades desde os $0,03\mu m$ até aos $4,67\mu m$.

Foram utilizados os mesmos níveis de rugosidade para as duas ligas utilizadas, neste conceito de fundição de estruturas finas, o alumínio e o cobre estanho. Desta comparou-se a influência que a fluidez e rugosidade têm em diferentes materiais. As condições ideais de vazamento foram sempre garantidas, quer seja o vácuo, quer a pressão. O equipamento utilizado foi um cadinho de indução que permite o controlo destas condições. Todo o envolvimento prático foi elaborado de acordo com o conteúdo, apresentado neste trabalho, garantindo a devida coerência dos ensaios práticos.

Com base nos resultados obtidos na prática experimental, consegue-se identificar a clara dependência da configuração superficial, que o fluxo de metal líquido tende a afirmar, quando é submetido a percorrer as superfícies internas dos canais. Em que, na medida do identificável, existe um claro crescimento do preenchimento de material nas cavidades internas, quando estas apresentam uma superfície rugosa. O que evidencia uma clara dependência do aumento da fluidez em virtude das superfícies rugosas, de acordo com os fundamentos teóricos estimulavam [14].

Subdividindo o comportamento da fluidez em termos de material utilizado, percebe-se que o alumínio assume um comportamento mais perseverante no que concerne á repetibilidade dos ensaios. Ou seja, nos ensaios experimentais utilizando a liga de alumínio, existiu uma dificuldade acrescida de

alterar as condicionantes do vazamento de modo a obter fundidos que não estivessem totalmente preenchidos. Pois ao obter-se fundidos totalmente preenchidos não se conseguiria utilizar um termo comparativo entre os diferentes níveis de rugosidade bem como o comportamento da fluidez. Porque o foco deste trabalho é relacionar os vários níveis de rugosidade e perceber se existe, ou não, influência no fluxo de material líquido.

Relativamente à junção do cobre e estanho, este material comporta-se de forma bastante peculiar. Difere e muito do comportamento da liga de alumínio, pois neste caso nunca se conseguiu obter uma repetibilidade á semelhança do alumínio. Normalmente segue uma tendência linear de acordo com a teoria apresentada, mas em momento algum se conseguiu obter um fundido que estivesse com as cavidades moldantes totalmente preenchidas (70mm). No caso da menor espessura testada (0,3mm) não se consegue que o metal líquido circule no interior dos canais. Muito provavelmente deve-se às suas propriedades físicas, nomeadamente por ser caracterizada com maior densidade, comparativamente ao alumínio. Ainda assim nas restantes gamas de espessuras utilizadas a tendência natural desta liga é a mesma, quando se fala em dependência da rugosidade na fluidez. Quando se utilizam maiores gamas de rugosidade a tendência para o metal líquido fluir é maior.

A realização de ensaios práticos e a sua respetiva análise, contribuíram em grande parte para o culminar de toda a investigação em torno dos objetivos principais. Em suma verifica-se a confirmação da teoria inicialmente lançada para este projeto, a influência da rugosidade na fluidez. Embora não estando quantificado para que valor exato se verifica uma maior tendência, no entanto pode-se garantir que aumentando o valor da rugosidade da superfície aumenta-se a possibilidade de obter uma melhor fluidez no momento em que o material quente percorre as cavidades de enchimento. Isto porque durante o enchimento do molde, ocorre uma menor transferência de calor e o metal não solidifica imediatamente. Pois se utilizarmos cavidades que contenham superfícies irregulares, reduz-se a área de contacto entre o metal e o molde, o que conduz a um enchimento maior por parte do metal.

Assim esta abordagem teórica confirmada na prática, pode confinar vantagens substanciais para os princípios de enchimento. Este fenómeno de sucesso é desejado para uma nova abordagem de componentes de *design*.

10. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como todos os estudos, sejam bem-sucedidos ou não, há sempre melhoramentos a níveis internos que podem ser elaborados. Exemplo disso é a forma geométrica que as superfícies podem apresentar de modo a serem conduzidas a resultados ainda mais confinados. Ou seja, inicialmente pensava-se que se poderia otimizar vários perfis de superfícies, selecionando aqueles que melhores propriedades apresentavam para o processo de fabrico de estruturas finas. Esse resultado não foi ainda encontrado, pois este é um estudo que por si só é de profunda análise, revelando-se eloquente. Assim sendo, é desta forma que fica no ar, para possíveis desenvolvimentos futuros, o estudo e detalhe da geometria e do seu respetivo comportamento na transferência de calor nas cavidades. Um estudo deste tipo pode conduzir ainda mais, ou até mesmo revelar-se vanguardista, à abertura de novos conceitos e tecnologias de alternativas à fundição de estruturas finas.

Outro possível melhoramento proposto prende-se com o capítulo da precisão da medição da rugosidade. De acordo com as medições de rugosidade efetuadas, verificou-se que esta pode conter alguns erros e não se apresentar como sendo uma medição com a exatidão pretendida. Pois os perfis de rugosidade criados podem conter erros de uniformidade, o que por si só vai influenciar as medições e consequentemente afetar a precisão da atividade experimental. Estes erros são obtidos através do contato direto do apalpador do rugosímetro. Este apalpador de leitura pode modificar a aquisição do perfil analisado devido a uma incorreta carga aplicada.

É desta forma que se considera imprescindível, para dar continuidade a este projeto, realizar o tratamento das superfícies por intermédio de um equipamento laser, eliminando o comum equipamento de medição . É sabido que este tipo de equipamento é capaz de criar um padrão de rugosidades bem mais uniforme e ao mesmo tempo ir de encontro à precisão pretendida para este projeto.

11. REFERÊNCIAS

- [1] D. B. Aeroskin, “www.dunlop.com,” [Online]. [Acedido em 08 11 2013].
- [2] S. F. Technologies, “www.speedo.com,” [Online]. [Acedido em 08 11 2013].
- [3] J. Nikuradse, Laws of flow in rough pipes VDI Vol. 361, Forschungsheft, 1933.
- [4] J. M. G. d. Carvalho, Tecnologia da Fundição, Lisboa: Fundação Calouste, 1999.
- [5] J. Barbosa, Processos de fundição, Universidade do Minho, 2003.
- [6] J. Barbosa, Introdução à tecnologia de fundição, Universidade do Minho, 2003.
- [7] A. V. d. Seabra, Metalurgia Geral, Volume II, 1995.
- [8] E. B. S. L. Victor and Whyllie, Mecânica dos Fluidos, MC Graw - Hill, 1982.
- [9] J. Holman, Transferência de Calor, Mc Graw - Hill, 1983.
- [10] V.-G. V. u. C. (GVC), VDI Heat Atlas, Springer, 2010.
- [11] R. C. Hibbeler, Resistência dos Materiais, Prentice Hall, 2004.
- [12] N. I. 4287/2002, *Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade*, 2002.
- [13] Copyright, Oxford University Pres, Blackwell Publishing, 1997.
- [14] Y.-B. D. a. P. Tong, Enhanced Heat Transport in Turbulent Convection over a Rough Surface, Oklahoma : Oklahoma State University, 1998.
- [15] H. Darcy, Recherches experimentales relatives au mouvement de l'Eau dans les Tuyaux, Mallet Bachelier, 1857.
- [16] N. R. d. Oliveira, Transformações microestruturais nas ligas de, Universidade de Aveiro: Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, 2008.
- [17] A. H. Cottrell, Introdução à Metalurgia, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1993.
- [18] A. S. Metals, Metals Hanbook, 1979.
- [19] M. R. Ayer, A Study of the Influence of Surface Roughness on Heat Transfer, Worcester, MA 01609: Worcester Polytechnic Institute, 2010.

- [20] M. Pawlak, Roughness of surface of vacuum castings, Technical University of Lodz: Department of Materials Engineering and Production Systems, 2011.
- [21] K. Kuwagi e M. A. & T. Takami, The Effects of Surface Roughness on Heat Transfer between Two Contacting Particles, Okayama, Japan: Okayama University of Science, 2007.
- [22] J. B. O. 0031, *Technical data of surface roughness and technical drawings*, 1994.