



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

*Caracterização mecânica da liga AlSi10Mg  
obtida por SLM para aplicação em componentes  
automóveis*

---

**David Mendes dos Santos**

Leiria, Novembro de 2014





Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

*Caracterização mecânica da liga AlSi10Mg  
obtida por SLM para aplicação em componentes  
automóveis*

---

**David Mendes dos Santos**

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação da Doutora Leopoldina Alves, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Joel Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Novembro de 2014

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# ***À Minha Família***

*Agradecimento especial à minha mãe e irmã pelo esforço e motivação dado durante a  
minha vida acadêmica*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

---

O meu principal agradecimento é para a orientadora e coorientador deste projeto, Doutora Leopoldina Alves e Doutor Joel Vasco, pelo esforço e dedicação que demonstraram durante a realização deste projeto.

Um grande obrigado ao Doutor Fernando Francisco de Jesus Romeiro, por todo o suporte e ajuda dado na realização dos ensaios de fadiga.

Agradeço também ao Engenheiro Carlos Dias pelo suporte técnico dado no laboratório de materiais e mecânica.

Ao diretor do departamento de qualidade e ambiente da empresa Fundiven S.A., Manuel Ferreira pelo interesse demonstrado neste projeto, assim como a disponibilidade no envio de amostras da liga AlSi10Mg obtida em molde permanente.

À Engenheira Andreia Nabais da empresa DIMLASER pelo interesse demonstrado neste projeto.

Ao Engenheiro João Nabais da empresa Seroplaste, pelo contacto desenvolvido com a Concept Laser para a obtenção dos provetes em AlSi10Mg obtidos por SLM.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumo

---

Este projeto visa efetuar a caracterização mecânica da liga AlSi10Mg obtida por SLM (Fundição de Metal por Laser) para aplicação em componentes automóveis.

Ao longo deste projeto é efetuada uma pesquisa bibliográfica das tecnologias de fabrico rápido mais frequentemente aplicadas ao processamento de alumínio, abordando de forma específica a tecnologia SLM, bem como a influência dos seus parâmetros no processamento de ligas de alumínio.

Será levado a cabo um estudo comparativo da liga AlSi10Mg fabricada por fundição em molde permanente com a obtida por SLM, analisando-se a microestrutura das ligas, bem como as suas propriedades mecânicas, através da realização de ensaios de dureza, tração, análise dinâmico-mecânica e fadiga. Deste modo será possível perceber as diferenças entre o comportamento mecânico da liga obtida por SLM e a liga obtida pelo método convencional.

Em resultado do estudo realizado, observou-se que a liga AlSi10Mg obtida por SLM apresenta uma microestrutura muito mais fina do que a liga fabricada por fundição em molde permanente, o que lhe permite ter um comportamento mecânico superior na maioria dos ensaios mecânicos realizados. Assim, é possível aplicar a tecnologia SLM ao fabrico de componentes em alumínio no sector automóvel, visto ser possível obter propriedades mecânicas superiores ou equivalentes aos componentes fabricados pelos processos de fabrico convencionais.

*Palavras-chave: Redução de peso em veículos, Ligas de Alumínio, AlSi10Mg, SLM, Propriedades Mecânicas.*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Abstract

---

This study aims to characterise the AlSi10Mg alloy manufactured by SLM (Selective Laser Melting) process for application in the automotive industry.

During this project will be performed a research on rapid manufacturing technologies capable of processing aluminum, specifically the SLM technology as well as the influence of its parameters in the processing of aluminum alloys.

Was performed a comparative study of AlSi10Mg alloy fabricated by die casting in a permanent mold with that obtained by SLM by analyzing the microstructure of the alloys and their mechanical properties by testing the hardness, tensile strength, DMA and fatigue.

As a result, it was observed that the AlSi10Mg alloy obtained by SLM provides a much smaller microstructure, which allows it to have a better mechanical behavior in most mechanical tests. Therefore, is possible to apply the SLM technology to the manufacture of aluminum components in the automotive industry, as it is possible to obtain superior or equivalent mechanical properties to those components fabricated by conventional manufacturing processes.

Key-Words: Light-Vehicles, Aluminium Alloys, AlSi10Mg, SLM, Mechanical Behaviour.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice de Figuras

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1- Forças resistentes ao movimento do veículo [2].   | 6  |
| Figura 2- Redução de emissões de CO <sub>2</sub> [2].   | 8  |
| Figura 3- Constituição típica dos materiais de um veículo de passageiros [3].   | 9  |
| Figura 4- Componentes em alumínio obtidas por conformação plástica [A-Pistão obtido por forjamento; B-Braço de suspensão forjado; C-Braço de suspensão obtido por extrusão; D-Eixo de transmissão obtido através de uma secção tubular (extrusão)] [2]. | 15 |
| Figura 5- A-Representação do modelo CAD vs STL [14]; B-Desenho esquemático do fabrico de um componente camada-a-camada [14].  | 28 |
| Figura 6- Processo de fabrico de sinterização por Laser [17].   | 29 |
| Figura 7- Princípio da tecnologia SLM [18].   | 30 |
| Figura 8- A- Parâmetros ajustáveis da passagem do laser; B- Exemplo de orientação das camadas [23].   | 31 |
| Figura 9- Projeção de suportes para o fabrico de componentes em SLM. A-Peça a ser contruída; B-Estudo de suportes para fabrico; C-Peça + Suportes fabricados por SLM [27].  | 33 |
| Figura 10- Exemplo da construção de provetes em diferentes planos. A-Horizontal; B-45° de inclinação; C-Vertical [28].  | 34 |
| Figura 11- Efeito dos principais parâmetros de SLM na liga de alumínio 6061 com um laser de 50W [23].   | 36 |
| Figura 12- Micrografia à liga de alumínio 6061. A- Superfície da fratura de uma amostra fabricada por SLM; B- Amostra do pó da liga 6061 [23].  | 37 |
| Figura 13- Micrografia da secção transversal do provete da liga de alumínio 6061 fabricada por SLM (Secção atacada com uma solução de NaOH ) [23].  | 38 |
| Figura 14- Efeito da estratégia de varrimento na liga ALSi10Mg obtida por SLM [30].   | 39 |
| Figura 15- Convecção de Marangoni na zona de fundição. B-Dissociação dos óxidos e solidificação da zona fundida [23].   | 40 |
| Figura 16- Rugosidade média da superfície do topo de componentes em ALSi10Mg produzidas por SLM com diferentes potências de laser e velocidades de varrimento [25].   | 41 |
| Figura 17- Densidade dos provetes de ALSi10Mg obtidos por SLM. A-Variação da velocidade; B - Variação do espaçamento entre passagens [18].  | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 18- Exemplo de estrutura dendrítica e da microestrutura de uma liga de alumínio hipoeutéticas atacada com Nital (2%). A- Dendrites (500x); B- Microestrutura (100x) [10].<br>.....  | 46 |
| Figura 19- Ensaio de dureza de Vickers [32].   | 47 |
| Figura 20-Método de determinação da tensão limite de elasticidade com offset [32].   | 49 |
| Figura 21- A-Exemplo de mecanismo de ensaio de DMA [34]; B-Ondas sinusoidais de tensão e deformação no DMA [34] .  | 50 |
| Figura 22- A-Iniciação e fase I e II de uma fenda de fadiga; B- Representação esquemática de intrusões e extrusões [35].   | 51 |
| Figura 23- Curvas S-N - Materiais Ferroso e Ligas de alumínio [32].  | 52 |
| Figura 24- Amostras da liga AISI10Mg obtidas por fundição convencional.  | 55 |
| Figura 25- Provetes de AISI10Mg obtidos por SLM.   | 56 |
| Figura 26- Diagrama inicial de ensaios.  | 57 |
| Figura 27- Diagrama de ensaios final.  | 59 |
| Figura 28- Preparação de amostras para análise da microestrutura. A-Amostra embutida em resina; B- Polidora e rotor de força; Microscópio Ótico utilizado.   | 60 |
| Figura 29- Equipamento de micro dureza de Vickers Shimadzu HMV-2.  | 61 |
| Figura 30- Dimensões do provete do ensaio de tração.   | 62 |
| Figura 31- A-Imagem ilustrativa de Corte de Electroerosão por fio [37]; B-Maquinação Roland MDX-650.   | 63 |
| Figura 32- Equipamento de ensaio de tração Zwick Z100.   | 63 |
| Figura 33- Dimensões de provetes para ensaios de DMA.  | 64 |
| Figura 34- Máquina de DMA Triton Tritec 200.   | 64 |
| Figura 35- Dimensões e geometria do provete do ensaio de fadiga.   | 65 |
| Figura 36- Equipamento de ensaio de fadiga Instron 8802.   | 66 |
| Figura 37- Microestrutura das ligas estudadas. A- Liga AISi10Mg fundida em molde permanente, a-20x, b-50x; c-100x; B- Liga AISi10Mg fundida por laser (plano de varrimento); C- Liga AISi10Mg fundida por laser (plano perpendicular ao varrimento), a-20x, b-50x; c-100x. | 67 |
| Figura 38- Microestrutura da liga AISi10Mg obtida por SLM; A- Plano de varrimento: a-5x, b-10x; B- Plano perpendicular ao varrimento:a-5x, b-10x.  | 68 |
| Figura 39- Evolução das medições de dureza efetuadas às duas ligas AISi10Mg.   | 70 |
| Figura 40- Superfície de fratura de provetes de tração, A- AISi10Mg obtida por SLM; B- AISi10Mg obtido em molde permanente.  | 73 |
| Figura 41- Resultados do ensaio de DMA para a temperatura ambiente da liga AISi10Mg obtida em molde permanente e SLM.  | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 42- Resultados do ensaio de DMA em temperatura transiente da liga AlSi10Mg obtida em molde permanente e SLM. ....   | 75 |
| Figura 43- Curva de ensaios de fadiga à liga AlSi10Mg obtida em molde permanente- com tratamento térmico. Amplitude máxima de tensão ( $\sigma_a$ , nom * Kt) por Numero de ciclos rotura até à rotura $K_t = 1.05$ [41]. .... | 77 |
| Figura 44- Resistência à fadiga e distribuição de Weibull da liga AlSi10Mg obtida por SLM construídos com uma plataforma a 300 °C [28]. ....   | 78 |

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice de Tabelas

---

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1- Normas Euro para Emissões de Gases para veículos Ligeiros [1].                                | 5  |
| Tabela 2- Uso do alumínio em veículos, 1989 [4].  | 11 |
| Tabela 3- Densidade e condutividade térmica típica dos Metais [6].                                      | 12 |
| Tabela 4- Ligas endurecíveis ou não por tratamento térmico de solubilização e precipitação [8].         | 14 |
| Tabela 5- Tecnologias de Fabrico Rápido Aditivo [13], [15].   | 21 |
| Tabela 6- Escala AHP utilizada na comparação de critérios.  | 24 |
| Tabela 7- Comparação paritária entre características.   | 25 |
| Tabela 8- Comparação paritária entres alternativas para o critério de produtividade                     | 25 |
| Tabela 9- Comparação paritária entres alternativas para o critério de acabamento superficial            | 26 |
| Tabela 10- Comparação paritária entres alternativas para o critério de dimensões máximas.               | 26 |
| Tabela 11- Comparação paritária entres alternativas para o critério de ligas de alumínio disponíveis.   | 26 |
| Tabela 12- Comparação paritária entres alternativas para o critério de tolerância dimensional           | 27 |
| Tabela 13- Provetes de ensaios necessários para plano inicial.  | 58 |
| Tabela 14- Provetes disponibilizados para ensaio obtidos por SLM.                                       | 58 |
| Tabela 15- Ensaios DMA a realizar.  | 65 |
| Tabela 16- Rugosidade dos provetes para ensaio de fadiga.   | 66 |
| Tabela 17- Microdureza Vickers da liga AlSi10Mg (Força= 4.903N, t=10 segundos).                         | 69 |
| Tabela 18- Valores de Microdureza de Vickers de referência para a Liga AlSi10Mg.                        | 70 |
| Tabela 19- Resultados do ensaio de tração.  | 71 |
| Tabela 20- Valores de referência das propriedades mecânicas da liga AlSi10Mg obtida por fundição e SLM. | 72 |
| Tabela 21- Resultados dos ensaios de fadiga realizados.   | 76 |

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de Siglas

---

- SLM** – *Selective Laser Melting* – Fundição de Metal por Laser;
- DMA** – *Dynâmic Mechanical Analysis* – Análise Mecânica Dinâmica;
- MCI** – Motor de Combustão Interna;
- CAD** – *Computer-Aided Design* – Desenho Assistido por Computador;
- CAM** – *Computer-Aided Manufacturing* – Fabrico Assistido por Computador;
- STL** – *Standard Template Library* – Malha Triangular;
- SLA** – *StereoLithography Apparatus* – Estereolitografia;
- MJM** – *Multi-Jet Modeling* – Modelação por Multi-Jato;
- FDM** – *Fused deposition Modeling* – Deposição de Material Fundido;
- SLS** – *Selective Laser Sintering* – Sinterização Seletiva por Laser;
- LENS<sup>®</sup>** – *Laser Engineered Net Shape* – Deposição de Material Fundido;
- EBM<sup>®</sup>** – *Electron Beam Melting* – Fundição por Feixe de Eletrões;
- BPM** – *Balistic Particle Manufacturing* – Fabrico por Injeção de Líquido Ligante;
- LOM** – *Laminated Object Manufacturing* – Fabrico por Laminação de Objetos;
- AHP** – *Analytic Hierarquic Process* – Processo de Análise Hierática;
- HV** – Dureza de Vickers;
- $\sigma$  – Tensão média do ensaio de tração [MPa];
- F** – Força aplicada no ensaio de tração [N];
- S<sub>0</sub>** – Área da secção inicial do provete do ensaio de tração;
- $\epsilon$  – Deformação;
- $\Delta L$**  – Deslocamento das amarras da máquina do ensaio de tração;
- L<sub>0</sub>** – Comprimento de referência do provete de tração;
- $\sigma_R$  – Tensão de rotura [Mpa];
- $\sigma_{c0.2\%}$  – Tensão limite de elasticidade proporcional a 0.2% de deformação;
- E\*** – Módulo complexo do ensaio DMA;
- E'** – Módulo de elasticidade do ensaio DMA;
- E''** – Módulo de perda do ensaio DMA;
- Tan  $\delta$**  – Amortecimento do material no ensaio DMA;

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice

---

|   |           |
|---|-----------|
| DEDICATÓRIA.....  | III       |
| AGRADECIMENTOS.....   | V         |
| RESUMO.....   | VII       |
| ABSTRACT.....   | IX        |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | XI        |
| ÍNDICE DE TABELAS.....  | XV        |
| LISTA DE SIGLAS.....  | XVII      |
| ÍNDICE.....   | XIX       |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. ENQUADRAMENTO.....   | 1         |
| 1.2. OBJETIVOS.....   | 2         |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....  | 2         |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                      | <b>5</b>  |
| 2.1. IMPORTÂNCIA DA REDUÇÃO DE PESO EM VEÍCULOS.....                      | 5         |
| 2.2. EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS EM VEÍCULOS.....                   | 8         |
| 2.2.1. <i>Carroçaria</i> .....  | 8         |
| 2.2.2. <i>Componentes do motor</i> .....                                  | 9         |
| 2.2.3. <i>Grupo Motopropulsor e chassis</i> .....                         | 10        |
| 2.2.4. <i>Aplicação de Alumínios na Indústria Automóvel</i> .....         | 10        |
| 2.3. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....   | 12        |
| 2.3.1. <i>Ligas de alumínio</i> .....                                     | 13        |
| 2.3.2. <i>Processos de fabrico convencionais do alumínio</i> .....        | 14        |
| 2.4. TECNOLOGIAS DE FABRICO RÁPIDO.....                                   | 17        |
| 2.4.1. <i>Fabrico rápido aditivo</i> .....                                | 18        |
| 2.4.2. <i>Fabrico rápido subtrativo</i> .....                             | 21        |
| 2.4.3. <i>Fabrico rápido aditivo em metais</i> .....                      | 22        |
| 2.5. FUNDIÇÃO DE METAL POR LASER (SLM).....                               | 28        |
| 2.5.1. <i>Mecanismo do processo</i> .....                                 | 29        |
| 2.5.2. <i>Parâmetros Ajustáveis</i> .....                                 | 31        |
| 2.5.3. <i>Estruturas de suporte e Estratégia de Construção</i> .....      | 33        |
| 2.5.4. <i>SLM no alumínio</i> .....                                       | 34        |
| 2.5.5. <i>Avanços tecnológicos da tecnologia SLM</i> .....                | 42        |
| 2.6. SELEÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO.....                                     | 44        |
| <b>3. CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA E MECÂNICA.....</b>                     | <b>45</b> |
| 3.1. CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA.....                                     | 45        |
| 3.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....   | 46        |
| 3.2.1. <i>Ensaio de Dureza</i> .....                                      | 46        |
| 3.2.2. <i>Ensaio de tração</i> .....                                      | 47        |
| 3.2.3. <i>Ensaio DMA</i> .....  | 49        |
| 3.2.4. <i>Ensaio de Fadiga</i> .....                                      | 51        |
| <b>4. METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>                     | <b>55</b> |
| 4.1. AMOSTRAS DAS LIGAS.....  | 55        |
| 4.1.1. <i>Liga AlSi10Mg obtida por fundição em molde permanente</i> ..... | 55        |
| 4.1.2. <i>Liga AlSi10Mg obtida por SLM</i> .....                          | 55        |
| 4.2. PLANO DE ENSAIOS.....  | 57        |
| 4.2.1. <i>Replaneamento dos Ensaios</i> .....                             | 58        |

|           |                                   |           |
|-----------|-----------------------------------|-----------|
| 4.3.      | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....   | 59        |
| 4.3.1.    | <i>Análise microscópica</i> ..... | 59        |
| 4.3.2.    | <i>Micro Dureza</i> .....         | 61        |
| 4.3.3.    | <i>Ensaio de tração</i> .....     | 62        |
| 4.3.4.    | <i>Ensaio DMA</i> .....           | 64        |
| 4.3.5.    | <i>Ensaio de Fadiga</i> .....     | 65        |
| 4.4.      | RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....    | 67        |
| 4.4.1.    | <i>Análise Microscópica</i> ..... | 67        |
| 4.4.2.    | <i>Dureza</i> .....               | 69        |
| 4.4.3.    | <i>Ensaio de tração</i> .....     | 71        |
| 4.4.4.    | <i>Ensaio DMA</i> .....           | 74        |
| 4.4.5.    | <i>Ensaio de Fadiga</i> .....     | 76        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....           | <b>81</b> |
| 5.1.      | TRABALHOS FUTUROS.....            | 83        |
|           | <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....         | <b>85</b> |
|           | <b>ANEXOS</b> .....               | <b>89</b> |

# 1. Introdução

---

## 1.1. Enquadramento

---

O desenvolvimento de veículos está cada vez mais influenciado por limites de emissões de CO<sub>2</sub> e de gases poluentes. Sendo os construtores automóveis obrigados a otimizar o veículo de modo a cumprir os limites impostos, uma das formas mais eficientes de redução de emissões é a redução de peso do veículo.

Neste contexto o alumínio, um metal de baixa densidade com excelentes propriedades mecânicas em algumas das suas ligas, apresenta-se como uma solução na substituição de componentes de aço e metais mais pesados, registando-se um aumento da sua utilização em veículos nos últimos anos.

Devido a algumas limitações apresentadas pelos processos de fabrico convencionais do alumínio, juntamente com o crescente desenvolvimento e comercialização de tecnologias de fabrico rápido, estas tecnologias surgem como uma ótima alternativa para o fabrico de componentes em alumínio para a indústria automóvel.

Sendo a tecnologia SLM capaz de produzir componentes em metal completamente funcionais a partir de um modelo CAD, apresenta-se como uma ótima solução para a produção de componentes em alumínio em fase de projeto do veículo ou, em casos específicos, como por exemplo na competição automóvel ou no fabrico de geometrias complexas.

Contudo, devido às condições de obtenção de forma bastante distintas deste processo, as propriedades mecânicas entre ligas equivalentes (métodos convencionais e tecnologias SLM) são ligeiramente distintas. Podendo, deste modo, ser necessário considerar estas diferenças na fase de projeto e desenvolvimento de novos componentes para a indústria automóvel.

Assim, torna-se pertinente efetuar uma análise ao comportamento mecânico de duas ligas de alumínio equivalentes (convencional e obtida por SLM) quando solicitadas em diferentes condições de funcionamento, analisando assim a diferença de comportamento entre as duas ligas.

## 1.2. Objetivos

---

As microestruturas das ligas de alumínio dependem fortemente da sua origem (processo de fabrico), dos elementos de liga e dos tratamentos térmicos. Neste contexto a obtenção de uma liga de alumínio através do processo SLM vai provocar uma alteração da sua microestrutura em relação ao processo de fabrico convencional, alterando conseqüentemente as suas propriedades mecânicas.

Deste modo, o objetivo da realização deste projeto passa então pela caracterização microscópica e mecânica da liga de alumínio AlSi10Mg obtida por SLM e pelo processo de fabrico convencional, de modo a perceber de que forma as diferenças ocorridas durante o processamento (fusão e arrefecimento) do alumínio influenciam a sua microestrutura e o seu comportamento mecânico quando sujeito a diferentes solicitações.

Pretende-se efetuar uma comparação entre as microestruturas das duas ligas de alumínio, para ser possível observar as diferenças das suas matrizes e do seu tamanho de grão. Serão realizados ensaios de dureza para perceber qual das ligas tem melhor resistência à penetração de objetos na sua superfície, bem como ensaios de tração para obter a resistência das ligas até à sua rotura, análises dinâmico-mecânicas para análise da evolução do comportamento mecânico das ligas a diferentes temperaturas e ainda ensaios de fadiga para o estudo do comportamento destas ligas quando sujeitas a esforços cíclicos.

## 1.3. Organização do documento

---

Este documento será constituído por um capítulo introdutório, onde o projeto é enquadrado com o setor automóvel, assim como, são definidos os objetivos a atingir durante a realização deste projeto.

O segundo capítulo do projeto tem no seu conteúdo a revisão bibliográfica, onde é abordada a influência da redução de peso nas emissões dos veículos, realizada uma pequena abordagem à evolução dos materiais utilizados em veículos, com uma ênfase dada ao alumínio e aos seus processos de fabrico convencionais, abordando as suas limitações. Seguindo-se um estudo das tecnologias de fabrico rápido capazes de processar

ligas de alumínio, abordando de forma específica a tecnologia SLM e a influência dos seus parâmetros no processamento de alumínio.

No capítulo três é feita uma caracterização da microestrutura das ligas de alumínio, assim como a caracterização dos ensaios mecânicos a realizar.

No quarto capítulo serão descritos todos os procedimentos experimentais dos ensaios realizados, sendo de seguida apresentados e comparados os resultados obtidos nas duas ligas (Liga convencional e SLM).

Por último, o capítulo 5 contém as conclusões retiradas com a realização deste projeto, sendo ainda sugeridos os trabalhos futuros que poderão complementar o estudo efetuado.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 2. Revisão Bibliográfica

---

### 2.1. Importância da redução de peso em veículos

---

A circulação de veículos em via pública tem uma enorme influência no que diz respeito à poluição atmosférica, a nível de emissões de gases de efeito de estufa e de gases nocivos para a saúde pública. Na tentativa de diminuir estes impactos ambientais os governos tentam lançar normas que possam limitar a quantidade de emissões dos automóveis em circulação. Surgem normas como as impostas pela Comissão Europeia para veículos ligeiros (Tabela 1) que visa limitar as emissões de gases de escape dos novos modelos automóveis.

Tabela 1- Normas Euro para Emissões de Gases para veículos Ligeiros [1].

| Norma           | Ano  | CO (g/km) |      | HC+NOx(g/km) |      | HC (g/km) |       | NOx(g/km) |       | PM(g/km) |        |
|-----------------|------|-----------|------|--------------|------|-----------|-------|-----------|-------|----------|--------|
|                 |      | Diesel    | Otto | Diesel       | Otto | Diesel    | Otto  | Diesel    | Otto  | Diesel   | Otto   |
| <b>EURO I</b>   | 1992 | 2.72      | 2.72 | 0.97         | 0.97 | -         | -     | -         | -     | 0.14     | -      |
| <b>EURO II</b>  | 1996 | 1         | 2.2  | 0.9          | 0.5  | -         | -     | -         | -     | 0.1      | -      |
| <b>EURO III</b> | 2000 | 0.64      | 2.0  | -            | -    | 0.56      | 0.2   | 0.5       | 0.15  | 0.05     | -      |
| <b>EURO IV</b>  | 2005 | 0.5       | 1    | -            | -    | 0.3       | 0.1   | 0.25      | 0.08  | 0.025    | -      |
| <b>EURO V</b>   | 2008 | 0.5       | 1    | -            | -    | 0.23      | 0.1   | 0.18      | 0.06  | 0.005    | 0.5    |
| <b>EURO VI</b>  | 2014 | 0.5       | 1    | 0.170        | -    | -         | 0.160 | 0.125     | 0.082 | 0.0045   | 0.0045 |

Estes limites cada vez mais exigentes, juntamente com os crescentes requisitos de desempenho dos veículos e exigência de baixos consumos por parte dos condutores, impulsionam os construtores automóveis a desenvolver novas tecnologias e estratégias durante o projeto do veículo de modo a corresponder a estes requisitos, sem nunca aumentar os seus custos.

Estas exigências influenciam o desenvolvimento das diversas áreas automóvel, como por exemplo a otimização de motores de combustão interna com tecnologia de controlo eletrónico cada vez mais complexas, o desenvolvimento de novas técnicas de combustão (sistemas de combustão combinados, combustão a baixa temperatura, etc...),

desenvolvimento e otimização de sistemas de tratamento de gases de escape (redutores de óxido nítrico e dióxido de nitrogênio, filtros de partículas, catalisadores de 3 vias entre outros), desenvolvimento de sistemas de propulsão híbridos (Motor de combustão interna (MCI) mais motor elétrico), desenvolvimento de sistemas de recuperação de energia térmica (como por exemplo o ciclo de Rankine), o melhoramento da aerodinâmica e a redução do peso do veículo. Grande parte destes desenvolvimentos visa reduzir o consumo de combustível do veículo e por consequência diminuir as emissões de gases de escape. Neste contexto, o peso do veículo apresenta-se como um elemento crítico no seu contributo para a diminuição do consumo do veículo.

Olhando para o total da energia libertada pela combustão no interior de um motor de combustão interna (MCI), apenas uma pequena percentagem dessa energia chega às rodas do veículo sob a forma de movimento, influenciada por diversos fatores: o rendimento do motor de combustão interna; as perdas de calor entre o motor e o meio envolvente; as perdas por atrito mecânico e a inércia do motor. Sendo a energia que chega às rodas do veículo responsável por colocar o veículo em movimento, esta deverá ultrapassar todas as forças que se lhe irão opor, nomeadamente as forças aerodinâmicas, forças de atrito entre o pneu e a estrada, força de oposição à aceleração e por último a componente de força provocada pelo peso do próprio veículo. Destas forças apenas a força aerodinâmica não é influenciada pelo peso do veículo como pode ser observado na Figura 1 [2].

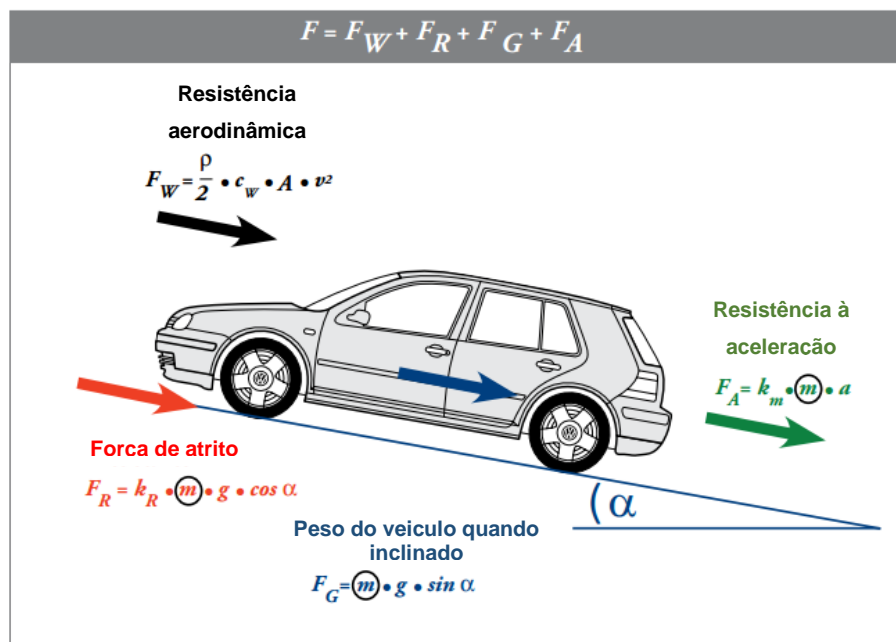


Figura 1- Forças resistentes ao movimento do veículo [2].

É possível observar que a massa do veículo ( $m$ ) influencia diretamente a força de atrito entre o pneu do veículo e a estrada, assim como em situação de subida ou aceleração do veículo esta também influencia a força que se opõe ao movimento. Isso significa que a capacidade por parte dos construtores de veículos em diminuir o peso total do veículo tem uma influência direta no consumo de combustível e emissões de gases poluentes para a atmosfera. Contudo, é difícil estabelecer uma relação direta entre a redução de peso e a respetiva redução de emissões. Dependendo de como o cálculo é efetuado podemos obter valores entre 3g/km até 13g/km de redução de CO<sub>2</sub> por cada 100 kg de redução de peso do veículo. Ambos os valores estão corretos mas são influenciados pelas variáveis de redução de peso que são consideradas. É pois importante distinguir dois tipos de redução de peso e dois tipos de poupança de energia [2]:

1. Redução de peso direta: Redução devido à substituição de um ou mais componentes de materiais pesados por outros de materiais mais leves.
2. Redução de peso indireta: Redução de peso adicional provocado pelo *downsizing* de certos componentes (por exemplo: travões, suspensão, motor, etc), mantendo o mesmo nível de desempenho anterior. Uma redução de peso do veículo pode significar uma diminuição de peso adicional em cerca de 50% no total do carro.
3. Poupança de combustível primária: Redução do consumo relacionada com a redução de energia necessária para colocar em movimento um veículo de peso reduzido.
4. Poupança de combustível secundária: Redução de consumo adicional obtido pela otimização da condução (por exemplo: relações de transmissão, eletrónica do motor, etc.), mantendo o desempenho anterior.

O gráfico da Figura 2 apresenta os valores de redução de emissões de CO<sub>2</sub> considerando as diferentes variáveis, baseado numa simulação de redução de consumo para um VW Golf 6 com um motor de 90 kW TSI considerando o ciclo de vida do veículo, publicado pelo *International Journal of Life Cycle Assessment (2010)*.

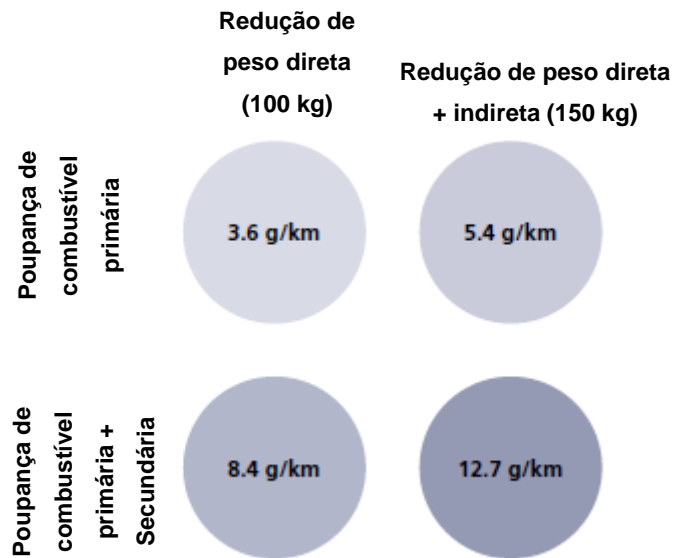


Figura 2- Redução de emissões de CO<sub>2</sub> [2].

Podemos observar que a menor redução de emissões de CO<sub>2</sub> é obtida quando são apenas considerados os aspectos primários. No entanto se forem consideradas todas as variáveis as melhorias obtidas são bastante superiores. Apesar das vantagens na redução de peso dos veículos já conhecidas, a inclusão de novos sistemas de segurança e conforto, não têm permitido reduzir o seu peso médio ao longo dos anos. Neste contexto, os materiais utilizados em veículos têm sofrido grandes evoluções baseando-se em dois pilares essenciais, a segurança e a proteção ambiental, com conseqüente procura de materiais mais leves.

## 2.2. Evolução dos Materiais Utilizados em Veículos

---

### 2.2.1. Carroçaria

---

Têm sido desenvolvidos novos materiais a utilizar na carroçaria dos veículos com o objetivo de resistirem à corrosão e permitirem a redução do seu peso. Nos anos 50 e 60, foram desenvolvidas tecnologias de produção em massa como resultado da elevada procura de automóveis. Um bom desempenho e rentabilidade era o importante nesse tempo. A

utilização de placas de aço com uma boa capacidade de deformação plástica assumiu a sua liderança durante os anos 50, seguindo-se as placas em aço inoxidáveis nos anos 60. Nos anos 70 e 80 o consumo de combustível tornou-se muito importante devido à crise do petróleo. Aços de alta resistência foram desenvolvidos para permitir a redução da espessura dos painéis. Em 1990, a segurança e as questões ambientais tornaram-se a prioridade na indústria automóvel, começando a ser procuradas novas técnicas de redução de peso. Placas de ligas de alumínio foram desenvolvidas neste contexto e aplicadas a vários painéis da carroçaria, contribuindo para a redução do peso dos veículos [3].

## 2.2.2. Componentes do motor

No caso dos materiais utilizados nos motores, estes são desenvolvidos com o objetivo de melhorar a sua durabilidade e desempenho, bem como de reduzir o peso dos seus componentes. Nos anos 50, ferro fundido dúctil ou nodular produzido em grandes quantidades foi aplicado à produção de cambotas. Nos anos 80, aços foram desenvolvidos e aplicados à produção de cambotas, bielas e bielas forjadas. Na tentativa de redução de peso, ligas de alumínio foram aplicadas em cabeças do motor e aços inoxidáveis coletores de escape. Nos anos 90, as ligas de alumínio são aplicadas no bloco do motor e ligas de magnésio na tampa das válvulas [3].

É possível observar na Figura 3 a evolução da utilização de diferentes materiais em veículos ligeiros de passageiros no mercado japonês.

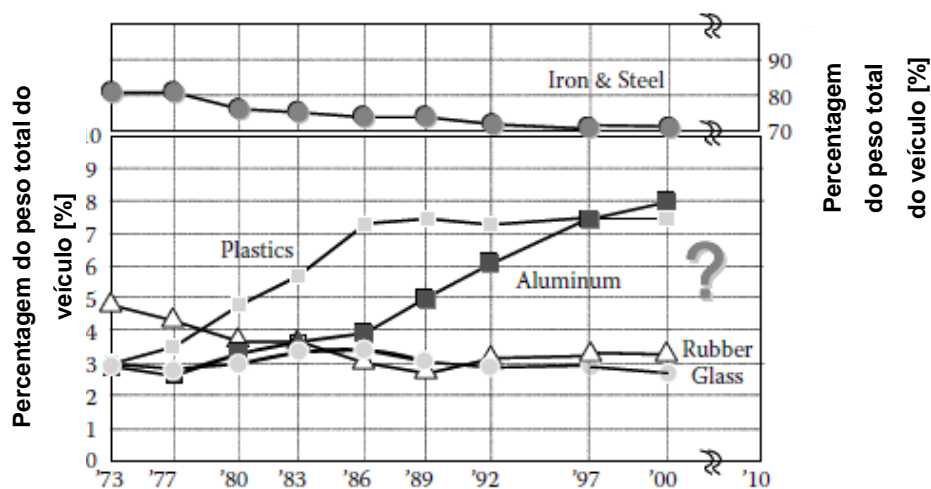


Figura 3- Constituição típica dos materiais de um veículo de passageiros [3].

Pode verificar-se uma clara tendência na redução de ligas de aço e ferro fundido e um aumento da utilização do alumínio. Já o caso dos plásticos tiveram um acentuado crescimento nos anos 80 mas a tendência é de estabilização.

### **2.2.3. Grupo Motopropulsor e chassis**

---

Os componentes do grupo motopropulsor dos veículos e os chassis são desenvolvidos com intuito de conseguir durabilidade e redução de peso. Placas de aço de alta resistência são aplicadas em componentes da suspensão e ligas de alumínio para as rodas. Mangas de eixo, ponteiros e perfis em I são também geralmente produzidos em aços. As ligas de alumínio, por sua vez, estão a ser cada vez mais usadas nas componentes de transmissão. Nos últimos anos, as ligas de manganês têm sido aplicadas nos sistemas de direção e em algumas transmissões. Os compósitos de carbono reforçados com fibras começam a ser usados em veios de transmissão [3].

### **2.2.4. Aplicação de Alumínios na Indústria Automóvel**

---

Os alumínios têm vindo a ser incluídos nos veículos em detrimento de metais mais pesados, pois a suas propriedades físicas têm permitido uma redução substancial do peso do veículo mantendo as suas funcionalidades.

Desde 1886, com o início da era dos automóveis e da produção industrial do alumínio, que os construtores de veículos têm tido um grande interesse pelos metais leves como o alumínio. Hoje em dia, volvidos mais de 100 anos, as aplicações na indústria automóvel representam mais de 25% do total de alumínio produzido mundialmente. No entanto, o alumínio em veículos nunca ultrapassou cerca de 3 a 5 % do seu peso, estando concentrado principalmente nos motores dos automóveis e seus periféricos [4]. As suas propriedades físicas têm despertado grandes potencialidades em diversas aplicações, por exemplo, na Tabela 2 é possível observar a presença de alumínio distribuindo pelas diversas áreas do veículo: motor, transmissão, chassis, etc.

Tabela 2- Uso do alumínio em veículos, 1989 [4].

| Grupo                    | <i>Distribuição do Alumínio nos diferentes grupos do veículo</i> |      | <i>Ligas fundidas</i> | <i>Ligas para deformação plástica.</i> |
|--------------------------|--|------|-----------------------|--|
|                          | [%]  | [kg] | [%]                   | [%]                                    |
| <b>Chassis</b>           | 30   | 16   | 90                    | 10                                     |
| <b>Motor/Transmissão</b> | 50   | 28   | 100                   | 0                                      |
| <b>Carroçaria</b>        | 15   | 8    | 20                    | 80                                     |
| <b>Equipamento</b>       | 5  | 3    | 40                    | 60                                     |
| <b>Total</b>             | 100  | 55   | 85                    | 15                                     |

Podemos observar a enorme versatilidade do alumínio em diversas aplicações na construção de componentes para veículos. Se analisarmos apenas as jantes e sistemas de chassis, o alumínio já conquistou cerca de 25% no mercado, em grande parte pela redução de peso proporcionada. É também verdade que as jantes em liga-leve conquistaram o mercado não pelo peso, mas sim por razões estéticas, sendo desenvolvidas e aplicadas parcialmente nos anos 70, não obtendo grande sucesso. A razão para a falha do sucesso do alumínio nestes anos era óbvia: elevado custo do material, elevados custos nos processos de fabrico, desenvolvimento inadequado na tecnologia dos materiais, principalmente em tecnologias de ligação de alumínio [4].

Durante as últimas duas décadas, vários construtores têm tentado repetidamente desenvolver e testar novas ligas de alumínio aplicadas à construção automóvel e novos métodos de ligação. Hoje é usado parcialmente em todos os veículos construídos, nos mais diversos componentes. Por exemplo, nos veículos produzidos na europa, em média, o grupo motopropulsor contém cerca de 80 kg de alumínio, correspondendo a 55-60% do alumínio total dos veículos [4].

No caso dos chassis e sistemas de chassis, em média os veículos produzidos na europa possuem cerca de 40 – 45 kg de alumínio, correspondendo a 30% do total do alumínio utilizado no veículo. Na carroçaria a substituição do tradicional aço por alumínio pode significar uma redução de 40% do seu peso. Sendo principalmente feitas a partir de placas de alumínio com uma ductilidade suficiente para serem estampadas ou a partir de perfis feitos por extrusão [4].

## 2.3. Alumínio e suas ligas

---

O elemento alumínio, com o símbolo químico Al, tem um número atômico de 13. Assim o átomo do alumínio é composto por 13 elétrons, distribuídos por três orbitas à volta do seu núcleo. Com três elétrons de valência na orbita exterior, tendo tendência então de se converter num catião com carga positiva ou seja +3 [5].

Os metais, na passagem do estado líquido para o estado sólido, assumem uma estrutura cristalina e os átomos organizam-se de forma simétrica. O alumínio, cobre, prata e ouro cristalizam com uma estrutura de átomos de face cúbica, comum à maior parte dos metais dúcteis. Isto significa que os seus átomos se dispõem nos cantos de um cubo. Com um átomo ao centro de cada face [5].

Como visto anteriormente possui características bastante atrativas para a sua utilização. A baixa densidade é a principal característica, pois tem aproximadamente um terço da densidade dos metais mais comuns, com exceção do titânio e do magnésio (Tabela 3).

Tabela 3- Densidade e condutividade térmica típica dos Metais [6].

| <b>Metal</b>              | <b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b> | <b>Condutividade Térmica (K)</b><br><b>[w/m.K]</b> |
|---------------------------|-------------------------------------|--|
| <b>Alumínio (99.996%)</b> | 2.6989                              | 247  |
| <b>Cobre Puro</b>         | 8.96                                | 398  |
| <b>Ferro Puro</b>         | 7.874                               | 80.4   |
| <b>Aço (1.22% de C)</b>   | 7.830                               | -  |
| <b>Magnésio (99.8%)</b>   | 1.738                               | 155  |
| <b>Titânio (99.9%)</b>    | 4.507                               | 11.4   |

Outra das características que torna o alumínio atrativo é este ser considerado não magnético, possibilitando assim a sua utilização em componentes eletrónicos. A elevada condutividade térmica é outra das características do alumínio, possibilitando a sua utilização em dissipadores de calor [5].

No que diz respeito à resistência à corrosão o alumínio também leva vantagem em relação à maioria dos metais, pois o alumínio em contacto com a atmosfera forma uma camada de óxido sobre a superfície que o protege contra a corrosão [5].

Relativamente à expansão térmica, para a maioria das ligas de alumínio o seu valor é cerca do dobro do aço, no entanto em ligas especiais de silício desenvolvidas para o fabrico de pistões dos MCI e cabeças de cilindros têm um baixo coeficiente de expansão [5].

Observando algumas propriedades do alumínio, podemos concluir que este tem diversas potencialidades, em aplicações em veículos. Sendo um metal dúctil permite a sua aplicação em estruturas de absorção de impacto. A baixa densidade e elevada resistência apresentada em algumas das suas ligas permite a sua utilização em diversas estruturas rígidas do veículo. A elevada resistência à corrosão permite também a sua utilização nos painéis da carroçaria. A elevada condutividade térmica potencializa a sua utilização em permutadores de calor. As ligas de alumínio com um baixo coeficiente de expansão térmica permitem a sua utilização em ambientes de temperaturas elevadas, por exemplo no interior dos cilindros dos MCI.

### **2.3.1. Ligas de alumínio**

---

O alumínio possui algumas qualidades bastante atrativas para diversas aplicações, no entanto possui algumas limitações como por exemplo a resistência mecânica, a dureza e o baixo ponto de fusão quando comparado com outros metais. No entanto o alumínio pode combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga, formando ligas com características ajustadas capazes de responder às exigências de diversas aplicações.

As propriedades mecânicas, físicas e químicas das ligas de alumínio dependem da sua constituição e microestrutura. A maioria das ligas de alumínio tem como elemento de liga o cobre, manganês, silício, magnésio e zinco, podendo estar presentes de forma singular ou combinada numa percentagem até 10% do total do seu peso. É difícil definir ao certo a função de cada elemento porque esta altera-se com a quantidade presente na liga, assim como com a interação com outros elementos [6], [7].

As ligas de alumínio podem ainda ser divididas segundo o fim a que se destinam, deformação plástica ou fundição, estas podem ser definidas como termicamente tratáveis ou não tratáveis. Designam-se de termicamente tratáveis as ligas que têm a particularidade de quando sujeitas a um tratamento térmico adquirirem melhorias significativas de resistência mecânica, através de um processo de endurecimento por precipitação.

Tabela 4- Ligas endurecíveis ou não por tratamento térmico de solubilização e precipitação [8].

| <b>Séries</b>                 |                     |                 |
|-------------------------------|---------------------|-----------------|
|                               | <b>Trabalháveis</b> | <b>Fundidas</b> |
| <b>Ligas Endurecíveis</b>     | 2XXX                | 2XX.0           |
|                               | 6XXX                | 3XX.0           |
|                               | 7XXX                | 7XX.0           |
|                               | 1XXX                | 1XX.0           |
|                               | 3XXX                | 4XX.0           |
| <b>Ligas Não-Endurecíveis</b> | 4XXX                | 5XX.0           |
|                               | 5XXX                | 3XX.0           |

As ligas de trabalho mecânico não endurecíveis por tratamento térmico de solubilização e precipitação podem ser endurecidas por deformação a frio, ou seja abaixo da temperatura de recristalização.

A classificação das ligas de alumínio segundo a *Aluminium Assotiation* de acordo com a percentagem de elementos de liga e o seu fim (Deformação plástica e fundição) são apresentados nos anexos 1 e 2.

### 2.3.2. Processos de fabrico convencionais do alumínio

---

Devido a esta enorme versatilidade da utilização do alumínio têm surgido grandes avanços tecnológicos nos processos de fabrico deste metal. Os processos de fabrico do alumínio podem ser divididos em dois grandes grupos, processos de conformação que utilizam ligas de alumínio para conformação plástica e processos de fundição que utilizam ligas de alumínio para fundição.

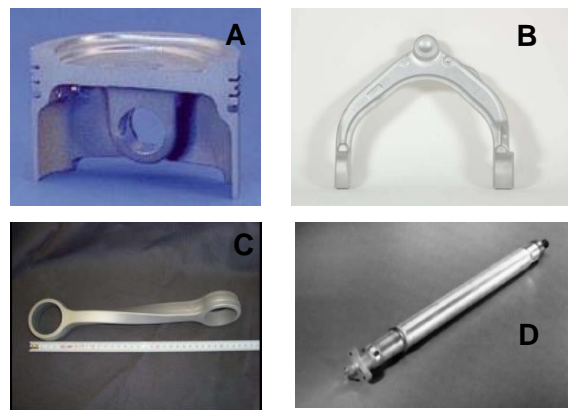
#### Processos de conformação

---

Uma grande vantagem na tecnologia dos metais é a capacidade com que podem ser conformados em formas úteis, tais como barras, tubos, chapas e outros perfis. Estas formas são obtidas por processos de deformação plástica, através do qual o volume e a massa são conservados (Forjamento, Laminação, Extrusão, etc). Em diversos produtos as

propriedades mecânicas dependem diretamente do controlo durante o encruamento, dependendo por isso diretamente do processo de fabrico de deformação plástica utilizado [8].

A procura de materiais de baixo peso específico, tais como ligas de alumínio para a indústria automóvel tem motivado o desenvolvimento de inúmeros processos de conformação. Componentes para colunas de direção e transmissão em ligas de alumínio 6061 e 6351 têm sido fabricadas através de extrusão inversa, obtendo peças tubulares até 1,5 mm de espessura. Estes componentes combinam a excelente formabilidade com a possibilidade de melhoria das propriedades mecânica através dos tratamentos térmicos aplicados a estas ligas (Endurecimento por Precipitação) [9]. A Figura 4 apresenta alguns componentes de automóveis em alumínio obtidos por conformação mecânica.



*Figura 4- Componentes em alumínio obtidas por conformação plástica [A-Pistão obtido por forjamento; B- Braço de suspensão forjado; C-Braço de suspensão obtido por extrusão; D- Eixo de transmissão obtido através de uma secção tubular (extrusão)] [2].*

De forma geral o aumento de temperatura nas ligas de alumínio diminui a força necessária para a sua conformação. Sendo que quando a temperatura provoca uma fusão parcial do material, normalmente do elemento de liga, os processos de conformação são designados de *thixoforming* [10].

Muitos dos componentes utilizados na indústria automóvel são obtidos por estes processos, destacando-se o processo de forjamento. Por exemplo válvulas, componentes de chassis, componentes de transmissão de potência e elementos do sistema de direção têm sido obtidos por forjamento em matriz.

Estes componentes, face as exigências das aplicações, requerem grande precisão dimensional, necessitando muitas das vezes de pós-processamentos (maquinação, tratamentos térmicos ou tratamentos superficiais).

## **Processos de Fundição**

---

Os três principais processos de fundição em ligas de alumínio são: fundição em molde de areia, fundição em molde permanente e fundição injetada.

A fundição em molde de areia é o processo de vazamento mais simples e mais versátil nas ligas de alumínio. Este processo é normalmente utilizado em pequenas séries de produção ou peças unitárias, peças vazadas complexas e com interiores complicados [11].

No processo de fundição em molde permanente, o metal líquido é introduzido no molde permanente por gravidade, baixa pressão ou simplesmente por pressão centrífuga. A mesma liga fundida em molde permanente apresenta um grão mais fino do que a obtida por fundição em molde de areia, apresentando por isso uma maior resistência mecânica, devido à grande velocidade de arrefecimento atingida na fundição em molde permanente. Além disso, o vazamento em molde permanente dá origem a menores contrações e menor porosidade. No entanto esta é limitada no tamanho das componentes produzidas e na complexidade das peças que podem ser produzidas [11].

Na fundição injetada atingem-se taxas de vazamento máximas para peças idênticas, sendo o metal líquido obrigado a entrar no molde por ação de uma pressão elevada. As maiores vantagens deste processo são: peças produzidas praticamente acabadas, taxas elevadas de produção, obtenção de peças com menor tolerância dimensional, superfícies de vazamento lisas e estrutura de grão fino provocadas pelo rápido arrefecimento [11].

A escolha correta do processo de fundição é influenciada por diversos fatores como por exemplo, o tamanho da peça fundida, a precisão dimensional requerida, a quantidade da produção, a dificuldade do processo etc. No entanto, a precisão requerida em alguns componentes do grupo motopropulsor obriga quase sempre a uma posterior maquinação.

## Limitações destes processos de fabrico

---

Apesar da grande versatilidade dos processos de conformação e fundição de alumínio estes têm bastantes limitações. Por exemplo, nos processos de conformação é apenas possível a obtenção de geometrias simples, sendo que em estruturas mais complexas é necessário um conjunto de componentes para a obtenção de geometrias complexas. No que diz respeito à conformação em matriz fechada, é necessário o fabrico de moldes para a obtenção da peça em alumínio, o que pode tornar o processo bastante dispendioso na produção de pequenas séries. Embora a utilização do *thixoforming* permita a obtenção de componentes com mais precisão que os processos de conformação convencional, a maioria das aplicações em componentes necessita de posterior maquinação e retificação.

A fundição de alumínio em moldes de areia permite a obtenção de peças bastante complexas (tendo na mesma limitações), no entanto visto serem utilizados moldes perdidos é necessário o fabrico de moldes para cada peça produzida, tornando o processo lento e dispendioso.

Neste contexto, as tecnologias de fabrico rápido apresentam-se como uma boa solução para a eliminação destas limitações.

## 2.4. Tecnologias de fabrico rápido

---

Designa-se por fabrico rápido, ou também *Solid Freeform Fabrication* um conjunto de processos de fabrico que permite a fabricação de modelos físicos tridimensionais diretamente a partir de um modelo CAD. Uma das suas grandes vantagens consiste no facto da geometria das peças ser independente do processo de construção. Podendo uma peça complexa ser construída tão facilmente como uma peça bastante simples. O protótipo é construído automaticamente numa máquina, praticamente num só passo sem necessidade de grandes fixações ou acompanhamentos [12].

Estas tecnologias são normalmente divididas em dois grupos. Tecnologias de fabrico por adição de material, normalmente construídas camada a camada e tecnologias de fabrico de remoção de material, onde um bloco de material é maquinado até ser obtida a forma desejada [13].

## 2.4.1. Fabrico rápido aditivo

---

As tecnologias de fabrico rápido por adição podem ser ainda dídas em dois grupos, de acordo com o estado da matéria-prima utilizada. Os processos envolvendo matéria-prima no estado líquido e no estado sólido.

### Estado Líquido

---

O processo de estereolitografia (SLA) foi a primeira tecnologia de fabrico aditivo disponível comercialmente, e é caracterizada por converter resina líquida fotosensível para o estado sólido com uma exposição seletiva da resina a uma luz ultra violeta. Neste processo o modelo CAD é dividido em camadas, em que cada camada é digitalizada pela luz UV curando a resina correspondente à secção da componente naquela camada. De seguida, a plataforma de construção desce o equivalente à espessura de uma nova camada e a secção da peça é novamente coberta com resina no estado líquido. Este processo repete-se novamente, camada a camada. Normalmente utilizado na construção de peças em polímero, existindo algumas variantes do processo aplicadas a peças de cerâmica e de metal utilizando partículas suspensas numa câmara de monómeros foto-curáveis [13].

O Multi-Jet Modeling (MJM) é também um processo de fabrico aditivo que utiliza resina ou polímero foto-curável que é depositada seletivamente por múltiplos bicos. E de seguida a luz UV efetua a cura do polímero ou da resina. Seguindo-se uma nova impressão sobre a camada impressa [13].

Podem ser ainda encontradas mais tecnologias que utilizam matéria-prima no estado líquido no entanto as referidas anteriormente são as mais relevantes.

## Estado Sólido

---

Assim como as tecnologias de fabrico rápido que utilizam matéria-prima no estado líquido como as referidas anteriormente, existem também tecnologias que utilizam pastas ou filamentos semissólidos para o fabrico de componentes, como por exemplo a modelação por deposição de material fundido (FDM) desenvolvido nos anos 80. O maior fabricante deste tipo de tecnologia é Stratasys INC (USA). Este processo deposita um filamento semi-fundido de material normalmente plástico, sobre um substrato, através de uma cabeça móvel. O material é aquecido no interior da cabeça e de seguida é extrudido e depositado numa camada onde é atingida a temperatura de solidificação.

Pertencente ao grupo das tecnologias que utilizam matéria-prima no estado sólido, estão inseridas as tecnologias fabrico rápido que utilizam pós de material para a produção de componentes, existindo uma grande variedade de materiais disponíveis assim como as respetivas tecnologias. Este tipo de tecnologia utiliza calor localizado de forma a unir os pós de material seletivamente, camada a camada. Nestas tecnologias estão incluídas a Sinterização Seletiva por Laser (SLS), em que o pó é espalhado por uma camada e de seguida é sinterizado seletivamente por um laser, a Deposição de Metal por Laser (LENS®), no qual é pulverizado localmente e de seguida é fundido por um feixe de laser de alta potência. Para o fabrico de componentes metálicas derivam duas tecnologias do SLS, a tecnologia de Fundição de Metal por Laser (SLM), onde o pó metálico é completamente fundido pelo laser e Fundição por Feixe de Eletrões (EBM®), em que o feixe de eletrões funciona como fonte de calor [13].

A sinterização seletiva por laser foi desenvolvida e patenteada pela Universidade do Texas, EUA. Fundando de seguida a empresa DTM Corporation em 1987 para comercializar esta tecnologia. Este processo utiliza a potência de um laser de CO<sub>2</sub> para efetuar a sinterização do material. Esta tecnologia pode utilizar vários materiais, tais como, poliamida, poliamida com micro esferas de vidro, elastómero, cerâmica e metais com polímeros ligantes [14]. Os mecanismos de ligação podem ser sinterização no estado sólido, ligação induzida quimicamente, sinterização em fase líquida e fundição parcial. Para as componentes em cerâmica e metal, as partículas são revestidas ou misturadas com polímeros servindo como elemento ligante. Depois de processadas é necessário remover o material ligante e finalizar a sinterização do material.

No caso da tecnologia SLM os pós metálicos são totalmente fundidos por um laser de grande potência formando componentes metálicas muito mais densas. O resultado obtido nas propriedades mecânicas pode ser igual ou superior a placas de metal laminadas. Os fabricantes destas tecnologias são Renishaw (Reino Unido), EOS GmbH (Alemanha), Concept Laser (Alemanha), SLM Solutions (Alemanha) e 3D Systems (EAU), existindo disponíveis diversos pós de metais e suas ligas [12], [13].

A fundição por feixe de elétrons é uma tecnologia que surgiu mais recentemente, a maior diferença em relação SLM como referido anteriormente é a fonte de energia utilizada. As componentes produzidas por EBM<sup>®</sup> são totalmente densas, sem poros e bastante resistentes. Comparativamente à tecnologia SLM, o EBM<sup>®</sup> geralmente tem taxas superiores de produção devido à maior densidade de energia, no entanto a qualidade superficial apresentada não é boa. A tecnologia EBM<sup>®</sup> foi desenvolvida e comercializada pela Arcam AB (Suécia) [13].

Outra das tecnologias de fabrico rápido aditivo que utiliza material em pó é a Impressão Tridimensional (3DP/BPM), em que uma camada de pó é pulverizada com um líquido ligante, solidificando de seguida a camada. Na impressão 3D várias combinações de pós podem ser usadas, com um ligante de baixa densidade para ser possível a sua pulverização. Podem ser produzidos componentes em plástico, cerâmica, metais e compósitos de metal e cerâmica. A sua principal desvantagem é a baixa densidade das peças produzidas devido à presença de poros, provocada pelas limitações de distribuição da camada de pó. É necessário pós-processamento para produzir peças funcionais, incluindo infiltrações e sinterização do material. Esta tecnologia é comercializada pela 3D Systems , Z Corporation, VoxelJet e ExOne [12], [13].

Neste grupo existe ainda a tecnologia Laminated Object Manufacturing (LOM), que utiliza durante o seu processo de fabrico material no estado sólido na forma de folha. Neste processo cada folha de material corresponde a uma camada, esta é cortada por um laser, correspondendo aos contornos geométricos da secção definidos pelo modelo CAD. Posteriormente uma nova camada é colada normalmente por adesivos sobre a secção anterior e o processo repete-se até à construção completa da peça. Os materiais utilizados neste processo podem ser papel revestido por adesivos, plásticos ou metal laminado. É difícil obter uma qualidade superficial com esta tecnologia pois esta depende da espessura da folha de material utilizado. Esta tecnologia foi primeiramente comercializada pela Helisys Inc [12].

As várias tecnologias de fabrico rápido aditivo podem ser comparadas na Tabela 5.

Tabela 5- Tecnologias de Fabrico Rápido Aditivo [13], [15].

| <b>Processo de fabrico</b> | <b>Preparação de material</b> | <b>Tecnologia de criação de camada</b> | <b>Materiais típicos disponíveis</b>                         | <b>Pós-processamento</b>  | <b>Acabamento superficial</b> | <b>Desperdício de material</b> |
|----------------------------|-------------------------------|--|--|---|-------------------------------|--------------------------------|
| <b>SLA</b>                 | Resina líquida em tanque.     | Varrimento por luz UV.                 | Resinas curáveis com luz UV.                                 | Não   | Regular                       | Não                            |
| <b>MJM</b>                 | Polímero líquido pulverizado  | Impressão por jato e varrimento UV.    | Resinas curáveis com luz UV.                                 | Não   | Regular                       | Não                            |
| <b>FDM</b>                 | Material semilíquido          | Extrusão contínua e deposição.         | Termoplásticos e ceras                                       | Sim   | Regular                       | Não                            |
| <b>SLS</b>                 | Depósito de pós               | Varrimento por Laser                   | Polímeros, vidro, metais e cerâmicas com polímeros ligantes. | Sim, quando utilizado metais e cerâmicas com polímeros ligantes | Excelente                     | Não                            |
| <b>SLM</b>                 | Depósito de pós               | Varrimento por laser                   | Metal  | Não   | Excelente                     | Não                            |
| <b>EBM®</b>                | Depósito de pós               | Varrimento por feixe de elétrons       | Metal  | Não   | Regular                       | Não                            |
| <b>LENS®</b>               | Injeção de pós                | Injeção e varrimento por Laser         | Metal  | Não   |                               | Não                            |
| <b>3DP/BPM</b>             | Depósito de pós               | Impressão de líquido ligante e pós.    | Polímeros, metal, cerâmica, entre outros.                    | Sim   | Boa                           | Não                            |
| <b>LOM</b>                 | Folhas de material utilizado  | Corte por Laser                        | Papel, plástico, metal.                                      | Sim, geralmente maquinação e retificação.                       | Fraca                         | Sim                            |

## 2.4.2. Fabrico rápido subtrativo

As tecnologias de fabrico rápido subtrativo, também chamadas de prototipagem rápida SRP são muitas das vezes confundidas com as tecnologias de maquinação convencional como por exemplo CNC, pelas semelhanças do equipamento. Os dois processos utilizam um bloco de material, desbastando-o até obter o objeto final. No entanto existem diferenças significativas entre o processo de SRP e os centros de maquinação. Enquanto os centros

de maquinação são normalmente utilizados para o fabrico de objetos em metal, os equipamentos SRP são pequenos, com perfil de desktops, usados normalmente na maquinação de polímeros e metais não ferrosos. As propriedades dos componentes são as do material maquinado. No entanto possui as mesmas limitações geométricas das máquinas CNC, dependendo do número de eixos disponíveis para maquinação [12].

### **2.4.3. Fabrico rápido aditivo em metais**

---

Os componentes de metal podem ser produzidos por processos de fabrico rápido aditivo de forma direta ou indireta. No caso dos processos indiretos, o material ligante das partículas metálicas que formam a componente tridimensional precisam de ser removidas com pós-processamento. No fabrico direto de metais as partículas de metal são totalmente fundidas, construindo uma peça final e funcional diretamente do processo.

Os processos de fabrico rápido SLM, EBM<sup>®</sup> e LENS<sup>®</sup> são considerados processos diretos para obtenção de peças metálicas funcionais, e utilizam como fonte de calor um laser de grande potência ou um feixe de elétrons para a fundição das partículas de metal. O mecanismo de ligação das partículas é uma fundição total. São obtidas peças totalmente densas, com propriedades mecânicas iguais ou mesmo melhores do que as obtidas pelos processos de fabrico convencionais.

Analisando as várias soluções de fabrico rápido disponíveis no mercado é necessário definir quais as tecnologias que mais se adequam ao fabrico de componentes em metal. No caso das tecnologias de fabrico rápido subtrativo estas têm a vantagem de as propriedades das componentes obtidas serem unicamente dependentes do “cubo de material” utilizado, no entanto, apresentam as mesmas desvantagens dos processos de maquinação convencionais, sendo limitadas pelo número de eixos disponíveis para maquinação e maquinação em zonas de difícil acesso. Estas limitações colocam estas tecnologias em desvantagem comparativamente com os processos de fabrico aditivos, que não são influenciados pela geometria do componente.

Em relação aos processos de fabrico aditivos que permitem a obtenção de componentes metálicos, os processos indiretos têm a desvantagem de necessitar da remoção do material ligante após a sua construção.

O processo LOM apesar de permitir a utilização de folhas de metal para o seu processo, necessita de pós-processamento para a junção das várias camadas. Para além disso, a qualidade superficial é bastante má pois esta é diretamente afetada pela espessura das folhas de metal utilizadas, necessitando quase sempre de processos de retificação da superfície.

Neste contexto os processos aditivos diretos de metal apresentam-se como a melhor solução para a obtenção de componentes de metal, pois permite a obtenção de peças funcionais diretamente da tecnologia de fabrico rápido, com excelentes propriedades mecânicas. Sendo estas tecnologias SLM, EBM® e LENS®, torna-se necessário efetuar um estudo destas três tecnologias de modo a obter a solução mais adequada para o fabrico de componentes em alumínio.

## **Análise comparativa das tecnologias de fabrico rápido direto em metais**

---

Como referido anteriormente as tecnologias que mais se adequam à produção de componentes em metal, são as tecnologias de fabrico rápido direto em metais, ou seja, SLM, EBM® e LENS®. Tendo como objetivo a seleção da tecnologia mais adequada para a produção dos provetes em alumínio para a realização do nosso estudo foram analisadas as três tecnologias. O estudo efetuado envolveu 5 características alvo: produtividade, tolerância dimensional, ligas de alumínio disponíveis, dimensão máximas de construção e acabamento superficial.

Para nos ajudar nesta análise utilizou-se o método de análise de decisão AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Este fundamenta-se na comparação de alternativas de escolhas, duas a duas, onde o decisor realiza pares de comparações relativos a duas alternativas da estrutura de decisão, questionando-se qual elemento satisfaz mais e quanto mais. Por meio do AHP, procura-se, perante um dado conjunto de  $n$  alternativas, separá-las em classes equivalentes e fornecer uma pré-ordenação que exprima as posições relativas destas classes à luz de determinados critérios [16].

Ou seja, no nosso estudo, possuindo três alternativas para a produção dos provetes, estas deverão ser comparadas aos pares, para cada uma das características (critério). No entanto, as características também deverão ser comparadas entre elas, para perceber qual delas terá mais peso na tomada de decisão.

É então necessário efetuar uma matriz de comparação entre as nossas 5 características, para definir a prioridade de cada uma delas. Estas são classificadas segundo a escala da Tabela 6.

Tabela 6- Escala AHP utilizada na comparação de critérios.

| <b>Escala</b> | <b>Descrição</b>      |
|---------------|-----------------------|
| 1             | Igual Importância     |
| 5             | Mais Importante       |
| 9             | Muito mais importante |

Para construir a matriz de comparação as características foram comparadas paritariamente. A comparação par a par, gera matrizes quadradas, onde o número na linha  $i$  e na coluna  $j$  dá a importância da característica  $i$  ( $C_i$ ) em relação à característica  $j$  ( $C_j$ ), como se observa na forma matricial indicada na seguinte equação [16]:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Os elementos  $a_{ij}$  indicam a comparação do par de critérios ( $C_i, C_j$ ) e  $\alpha$  o valor da intensidade de importância. Definem-se as seguintes regras para cada elemento  $a_{ij}$  da matriz [16]:

- Se  $a_{ij} = \alpha$ , então  $a_{ji} = 1/\alpha$ ,  $\alpha \neq 0$ ;
- Se  $C_i$  é julgado como de igual importância relativa a  $C_j$ , então  $a_{ij} = 1$ ,  $a_{ji} = 1$  e  $a_{ii} = 1$ , para todo  $i$ .

Segue-se então a comparação paritária entre as características definidas na Tabela 7.

Tabela 7- Comparação paritária entre características.

|                                      | <b>Produtividade</b> | <b>Acabamento superficial</b> | <b>Dimensões máximas de fabrico.</b> | <b>Ligas de alumínio disponíveis</b> | <b>Tolerância Dimensional</b> | <b>Prioridade</b> |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| <b>Produtividade</b>                 | 1                    | 1/5                           | 5                                    | 1/9                                  | 1/9                           | 0,08              |
| <b>Acabamento superficial.</b>       | 5                    | 1                             | 9                                    | 1/9                                  | 1                             | 0,20              |
| <b>Dimensões máximas de fabrico.</b> | 1/5                  | 1/9                           | 1                                    | 1/9                                  | 1/9                           | 0,02              |
| <b>Ligas de alumínio disponíveis</b> | 9                    | 9                             | 9                                    | 1                                    | 9                             | 0,46              |
| <b>Tolerância Dimensional</b>        | 9                    | 1                             | 9                                    | 1/9                                  | 1                             | 0,25              |
| <b>Totais</b>                        | 24,20                | 11,31                         | 33,00                                | 1,44                                 | 11,22                         | 1,00              |

Esta comparação teve em vista apenas a produção dos provetes, pelo que foi dada menos importância à produtividade e às dimensões máximas permitidas por cada um dos processos, dado o número de provetes a produzir ser limitado e as dimensões reduzidas. De notar que, para a produção de um determinado componente as considerações a ter neste tipo de comparações é totalmente diferente.

Sabendo agora o grau de prioridade de cada uma das características é necessário proceder ao estudo do desempenho das três tecnologias para cada uma delas. A Tabela 8 apresenta a matriz de comparação das três tecnologias relativamente ao critério de produtividade.

Tabela 8- Comparação paritária entre alternativas para o critério de produtividade

| <b>Produtividade</b> | <b>SLM</b> | <b>EBM®</b> | <b>LENS®</b> | <b>Prioridade</b> |
|----------------------|------------|-------------|--------------|-------------------|
| <b>SLM</b>           | 1          | 1/5         | 9            | 0,455             |
| <b>EBM®</b>          | 5          | 1           | 5            | 0,491             |
| <b>LENS®</b>         | 1/9        | 1/9         | 1            | 0,0545            |
| <b>Totais</b>        | 6,11       | 1,31        | 15           | 1                 |

A comparação das várias alternativas para o critério de produtividade teve em conta as velocidades de varrimento máximas de alguns dos fabricantes de máquinas destas tecnologias, como a EOS, a ARCAM Suécia e a OPMETEC LENS®.

Tabela 9- Comparação paritária entres alternativas para o critério de acabamento superficial

| <b>Acabamentos Superficial</b> | <b>SLM</b> | <b>EBM®</b> | <b>LENS®</b> | <b>Prioridade</b> |
|--------------------------------|------------|-------------|--------------|-------------------|
| <b>SLM</b>                     | 1          | 5           | 9            | 0,666             |
| <b>EBM®</b>                    | 1/5        | 1           | 5            | 0,275             |
| <b>LENS®</b>                   | 1/9        | 1/5         | 1            | 0,058             |
| <b>Totais</b>                  | 1,311      | 6,2         | 15           | 1                 |

No caso do acabamento superficial, comparado na Tabela 9, foram tidas em conta as densidades energéticas de cada sistema, assim como o diâmetro de foco, pois normalmente grandes densidades energéticas e elevados diâmetros de foco originam maus acabamentos superficiais.

Tabela 10- Comparação paritária entres alternativas para o critério de dimensões máximas.

| <b>Dimensões Máximas</b> | <b>SLM</b> | <b>EBM®</b> | <b>LENS®</b> | <b>Prioridade</b> |
|--------------------------|------------|-------------|--------------|-------------------|
| <b>SLM</b>               | 1          | 1/5         | 1/9          | 0,0582            |
| <b>EBM®</b>              | 5          | 1           | 1/5          | 0,275             |
| <b>LENS®</b>             | 9          | 5           | 1            | 0,666             |
| <b>Totais</b>            | 15         | 6,2         | 1,311        | 1                 |

Na Tabela 10 encontra-se representado o critério de dimensão máxima. Consideraram-se para efeitos de comparação as medidas da plataforma de construção das máquinas de maior dimensão disponibilizadas pela EOS, a ARCAM Suécia e a OPMETEC LENS.

Tabela 11- Comparação paritária entres alternativas para o critério de ligas de alumínio disponíveis.

| <b>Ligas de Alumínio disponíveis</b> | <b>SLM</b> | <b>EBM®</b> | <b>LENS®</b> | <b>Prioridade</b> |
|--------------------------------------|------------|-------------|--------------|-------------------|
| <b>SLM</b>                           | 1          | 9           | 1            | 0,57              |
| <b>EBM®</b>                          | 1/9        | 1           | 1/5          | 0,07              |
| <b>LENS®</b>                         | 1          | 5           | 1            | 0,36              |
| <b>Totais</b>                        | 2,11       | 15          | 2,2          | 1                 |

Das tecnologias disponíveis para o processamento de metais, deu-se destaque às tecnologias que disponibilizavam maior número de pós de ligas de alumínio para processar. Na comparação efetuada na Tabela 11 foram tidas em conta ligas disponibilizadas pelos comerciantes destas tecnologias e os pós disponibilizados pelo fabricante de matérias-primas para tecnologias de fabrico rápido, LPW Technology.

A Tabela 12 apresenta a comparação das alternativas relativamente à tolerância dimensional, sendo definida de acordo com o diâmetro de foco da fonte de energia e as tolerâncias fornecidas pelos fabricantes das várias tecnologias em análise.

Tabela 12- Comparação paritária entres alternativas para o critério de tolerância dimensional

| <b>Tolerância Dimensional</b> | <b>SLM</b> | <b>EBM®</b> | <b>LENS®</b> | <b>Prioridade</b> |
|-------------------------------|------------|-------------|--------------|-------------------|
| <b>SLM</b>                    | 1          | 5           | 9            | 0,666             |
| <b>EBM®</b>                   | 1/5        | 1           | 5            | 0,275             |
| <b>LENS®</b>                  | 1/9        | 1/5         | 1            | 0,058             |
| <b>Totais</b>                 | 1,31       | 6,2         | 15           | 1                 |

De modo a definir qual a tecnologia que melhor se adequa para a construção dos nossos provetes foi efetuada a soma do produto da prioridade de cada critério pela prioridade da alternativa nesse critério:

$$\begin{aligned}
 SLM &= (0.08 * 0.45) + (0.20 * 0.67) + (0.02 * 0.058) + (0.46 * 0.57) + (0.25 * 0.67) \\
 &= 0.60 \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 EBM &= (0.08 * 0.49) + (0.20 * 0.27) + (0.02 * 0.28) + (0.46 * 0.07) + (0.25 * 0.28) \\
 &= 0.201 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 LDM &= (0.08 * 0.055) + (0.20 * 0.058) + (0.02 * 0.67) + (0.46 * 0.36) + (0.25 * \\
 &0.058) = 0.210 \quad (4)
 \end{aligned}$$

Em suma, pode afirma-se, mediante a análise AHP, que a tecnologia que mais se adequa ao nosso estudo é a de fundição de metal por laser.

## 2.5. Fundição de Metal por Laser (SLM)

---

Tal como referido anteriormente, as tecnologias de fabrico rápido permitem obter um modelo físico diretamente a partir do modelo CAD. Assim, a tecnologia SLM como a maioria das restantes tecnologias de fabrico rápido pode ser dividida em oito etapas [15]:

1. Modelação em sistema CAD (Obtenção do modelo numérico 3D);
2. Conversão do modelo CAD para o formato STL (*Standard Template Library*, uma malha triangular como representada na Figura 5A);
3. Envio do modelo STL para o sistema, normalmente específico de cada processo/ máquina de fabrico;
4. Definição da orientação de construção do componente (horizontal/vertical ou com inclinação);
5. Estudo da necessidade de estruturas de suporte para o fabrico do componente;
6. Divisão do modelo físico em finas camadas paralelas entre si e preparação para construção (definição dos parâmetros do processo);
7. Fabrico do componente (Figura 5B), onde o sistema e o componente é fabricado;
8. Quando necessário, pós-processamento (no caso da tecnologia SLM apenas acabamentos em zonas de precisão).

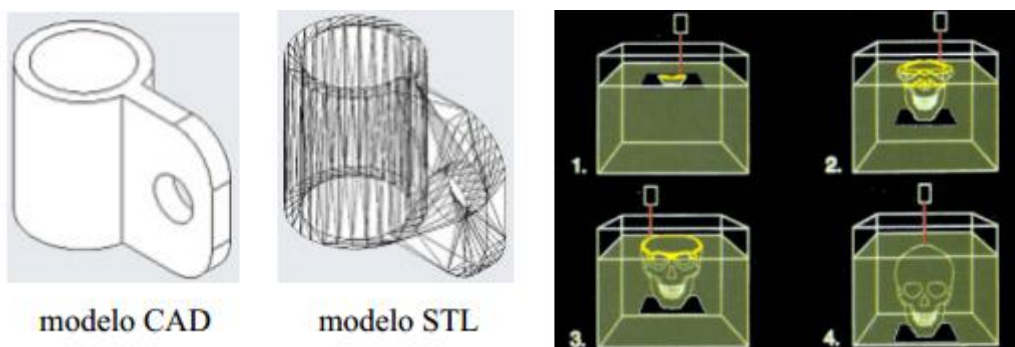


Figura 5- A-Representação do modelo CAD vs STL [14]; B-Desenho esquemático do fabrico de um componente camada-a-camada [14].

## 2.5.1. Mecanismo do processo

O mecanismo do processo de fundição de metais por laser (SLM) é bastante semelhante ao processo de sinterização seletiva por laser (SLS), desenvolvido pela DTM, utilizando contudo um laser de maior potência de modo a permitir a fusão das partículas de metal. Este processo é constituído por duas ou três plataformas de deposição de pó, um rolo e um laser. A plataforma de alimentação de pó durante o processo tem um movimento ascendente de forma a alimentar a plataforma de construção por intermédio de um rolo (Figura 6) [17].

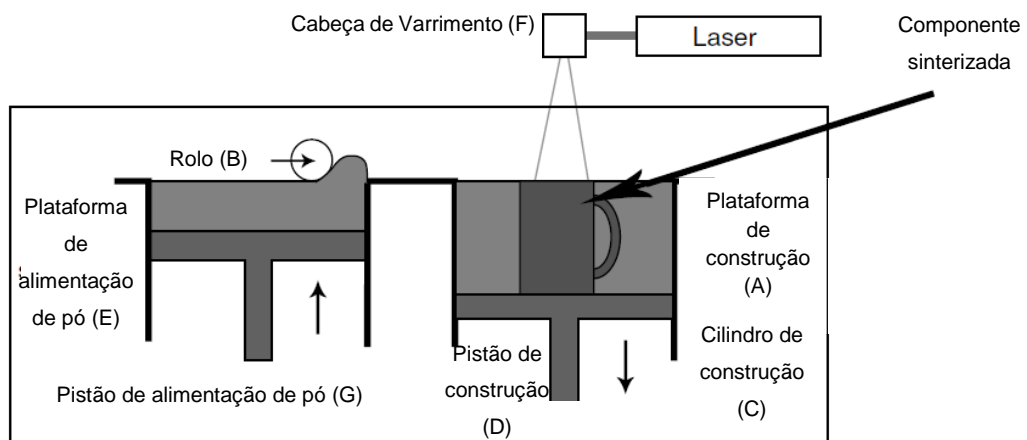


Figura 6- Processo de fabrico de sinterização por Laser [17].

O rolo (B) é usado para espalhar o pó correspondente à espessura de uma camada sobre a plataforma de construção. Depois de espalhada a camada de pó na plataforma de construção (A), a cabeça de varrimento (F), controlada computacionalmente, efetua o varrimento laser da camada espalhada de acordo com a secção da peça modelada, fundindo as partículas de metal pela absorção do fluxo de energia provocado pelo feixe laser. O pistão de construção (D), efetua de seguida um movimento descendente de forma a acomodar uma nova camada de pó por cima da secção já solidificada. O pistão de alimentação de pó (G) efetua novamente um movimento ascendente de forma a poder fornecer ao rolo uma quantidade suficiente de pó para este espalhar uma nova camada sobre a plataforma de construção. Este processo é repetido camada a camada até que a peça esteja totalmente fabricada. No final é removido todo o pó que não foi fundido obtendo-se assim o componente final (Figura 7) [17], [18].

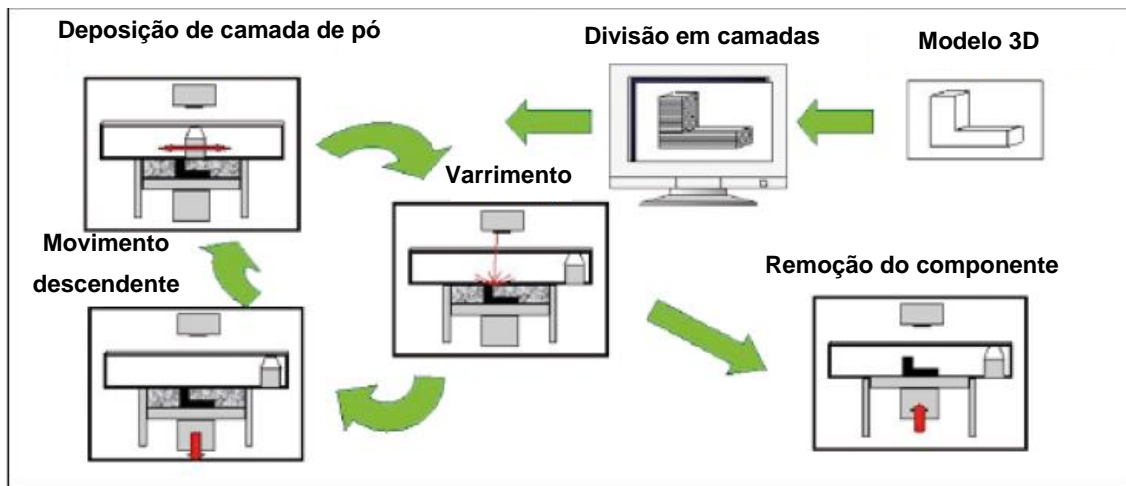


Figura 7- Princípio da tecnologia SLM [18].

A tecnologia aditiva de fundição de metal por laser possibilita o fabrico de componentes metálicos totalmente funcionais, sem limitações na complexidade das geometrias a produzir.

Os pós utilizados são 100% metálicos e desenvolvidos especificamente pelas empresas que comercializam esta tecnologia, podendo ser pós de um metal puro ou uma mistura de pós contendo elementos de ligas com um ponto de fusão mais baixo. As partículas de pó têm normalmente dimensões entre 10-45  $\mu\text{m}$ , existindo atualmente disponíveis no mercado pós de aços, ligas de alumínio, cobre, titânio, entre outros. Estas partículas são totalmente fundidas numa atmosfera de gás inerte, obtendo assim componentes em metal com uma densidade aproximadamente de 100% e com propriedades mecânicas equivalentes ou melhores que as produzidas pelos métodos convencionais (maquinadas, conformadas e fundidas) [18], [19].

Os lasers utilizados atualmente nas máquinas SLM são normalmente de fibra, podendo ir até aos 1000W de potência. Em alguns casos possuem dois lasers, com um diâmetro de foco de entre os 40-750  $\mu\text{m}$  e podendo atingir uma taxa de produção entre 1-20  $\text{mm}^3/\text{s}$ . Normalmente o aumento da potência do laser leva ao aumento do diâmetro do foco na sinterização de alguns dos materiais, de modo a evitar uma densidade energética excessiva. Estes permitem ainda a sinterização de componentes até 630\*400\*500 mm [20], [21], [22].

## 2.5.2. Parâmetros Ajustáveis

Os principais parâmetros da tecnologia SLM que influenciam o processo são a potência do laser, a velocidade de varrimento, a espessura da camada (influenciada pela granulometria do pó metálico) e os aspectos geométricos de orientação do laser [19]. Os parâmetros geométricos da trajetória do laser que podem ser definidos são os pontos de passagem do laser, distância do contorno do laser às margens da peça, distância entre o contorno e as restantes passagens, distância entre passagens e ainda a orientação do laser entre uma camada e outra (Figura 8).

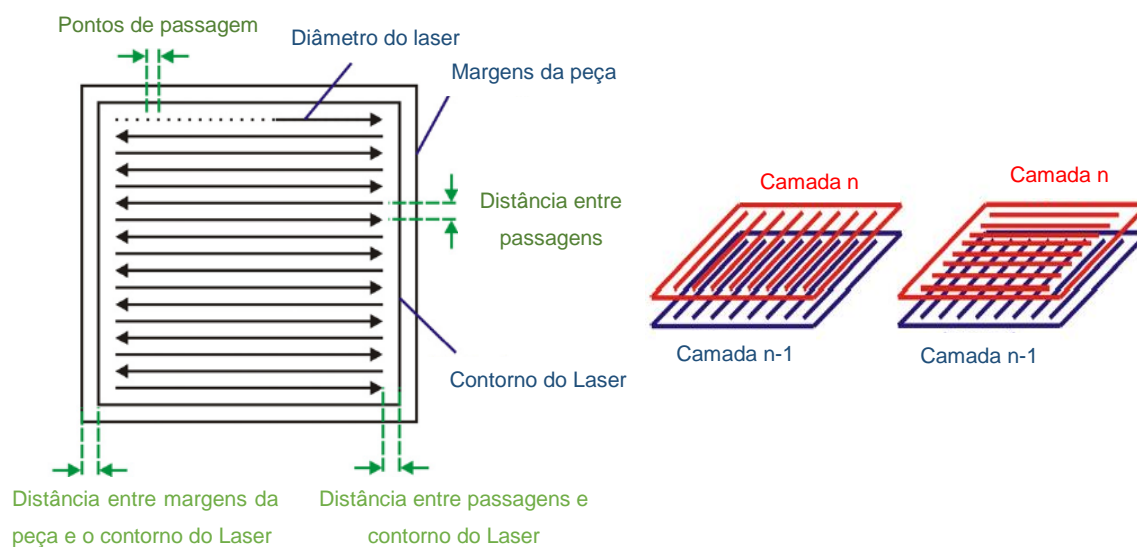


Figura 8- A- Parâmetros ajustáveis da passagem do laser; B- Exemplo de orientação das camadas [23].

A otimização destes parâmetros tem influência direta nas características da peça fabricada por SLM, no acabamento superficial e microestrutura, nas propriedades mecânicas e também no custo e tempo de produção. Assim antes da produção de um componente por SLM estes devem ser cuidadosamente definidos. No entanto, a primeira otimização a ser feita no processamento de novos materiais por SLM é a obtenção de peças totalmente densas [23].

Observando o processo de construção, em cada camada a construir, o laser começa por fundir o contorno com uma determinada velocidade. Uma vez que a zona afetada pelo laser é superior à dimensão do foco, a posição deste tem que ser deslocada para o interior da camada cerca de metade do diâmetro da referida zona, de modo a que a linha traçada corresponda ao contorno definido no CAD [19]. Esta correção à posição do foco do laser é designada por compensação do laser e tem uma influência decisiva sobre a precisão dimensional das peças [19].

No processo de fundição por laser, o material recebe energia apenas durante frações de segundo, arrefecendo logo em seguida devido à velocidade com que o laser se desloca. Os fenômenos físicos que ocorrem no substrato de pó sujeito ao feixe do laser inclui absorção de energia, reflexão, transferência de calor, transformação de fase, movimento entre a fase líquida e fase sólida, movimento do fluido causado pelas tensões superficiais causando o movimento da massa sólida para uma zona de metal fundido e ainda reações químicas. Estas reações não variam de forma linear quando os parâmetros do processo são modificados. Por exemplo, mudando a potência do laser ou a velocidade de varrimento pode levar a vários efeitos indesejáveis como a irregularidade e efeito *balling* (formação de esferas de metal com diâmetro igual ao do foco do laser, provocadas por uma baixa viscosidade da mistura do metal fundido/sólido) [19], [24].

A definição correta de todos os parâmetros permite uma correta absorção de energia, permitindo assim a correta densificação da peça. A densidade energética tem que ser otimizada de modo a que o substrato de pó metálico absorva uma quantidade suficiente de energia para fundir todas as partículas de pó, no entanto não pode ser demasiado alta para não provocar fenômenos prejudiciais para a peça, como o já falado fenômeno de *balling*. Os parâmetros do processo devem ainda ser ajustados de acordo com o acabamento, tolerância dimensional e tempo de fabrico requerido para as peças.

Definidos os requisitos, de densidade e de acabamento superficial para os componentes fabricados por SLM, é possível definir a produtividade da máquina de SLM. A produtividade de uma máquina de SLM pode ser definida pela seguinte equação [25]:

$$V = t \cdot v \cdot ss \quad (5)$$

Definir a produtividade da máquina ( $V$  [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ]), sem perder os requisitos da peça é uma das otimizações que deverá ser feita no processo SLM, podendo conjugar três parâmetros, espessura de camada utilizada ( $t$  [ $\text{mm}$ ]), velocidade de varrimento ( $v$  [ $\text{mm}/\text{s}$ ]) e o espaçamento entre passagens ( $ss$  [ $\text{mm}$ ]). A título de exemplo pode-se aumentar por exemplo a qualidade superficial dos componentes com a redução da velocidade de varrimento, aumentando assim o tempo de produção da máquina.

### 2.5.3. Estruturas de suporte e Estratégia de Construção

---

Os parâmetros do processo e a estratégia de varrimento apresentam influência na microestrutura da peça obtida por SLM. A microestrutura é bastante afetada pela elevada fonte de calor localizada em espaços de tempo muito reduzidos. Os locais de transferência de calor determinam a orientação dos grãos da estrutura cristalina. Para além destas elevadas taxas de transferência de calor (elevadas taxas de arrefecimento) produzirem efeitos na microestrutura das peças, provocam também elevadas tensões residuais durante a construção dos componentes, forçando a utilização de suportes rígidos (Figura 9) durante a construção. Deste modo garante-se que não há distorção da peça no reservatório de deposição de pó metálico pois a instabilidade dos pó pode levar a grande deformação na peça final [26].

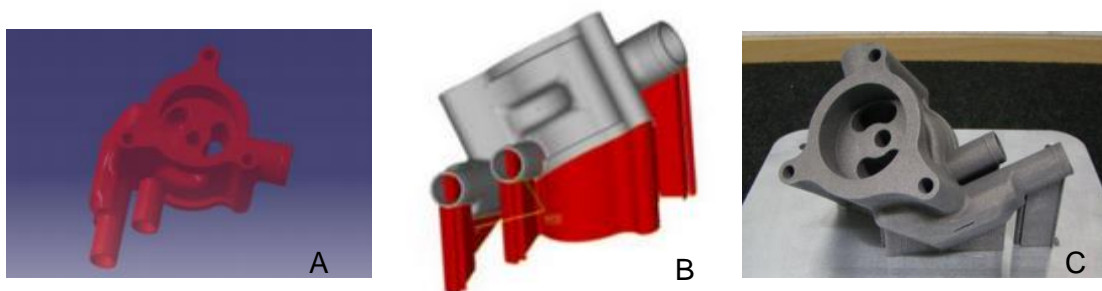


Figura 9- Projeção de suportes para o fabrico de componentes em SLM. A-Peça a ser construída; B-Estudo de suportes para fabrico; C-Peça + Suportes fabricados por SLM [27].

Durante o processo de SLM são induzidas tensões internas nos componentes, as quais são induzidas termicamente nas camadas pela energia fornecida pelo foco do laser. Para suportar estas distorções são construídas estruturas de suporte entre a peça fabricada e o substrato. No entanto, devido à complexidade de determinadas peças, não é possível colocar estas estruturas em todas as áreas onde estas são necessárias.

Outra das técnicas utilizadas para reduzir estas distorções é o pré-aquecimento da peça durante o processo de SLM. Deste modo reduz-se o diferencial térmico entre o foco do laser e a restante peça [18]. Este pré-aquecimento pode reduzir a necessidade de estruturas de suporte, aumentando assim a produtividade da máquina de SLM (com estruturas de suporte o tempo de fabrico aumenta) [18].

Devido ao arrefecimento direcional ocorrido durante o processo SLM e à fundição camada a camada, as peças metálicas fabricadas não apresentam uma estrutura isotrópica, possuindo assim ligeiras diferenças de comportamento mecânico quando solicitadas no sentido de construção ou transversalmente. Esta anisotropia apresentada pode levar à construção das peças com determinados graus de inclinação relativamente ao plano de varrimento, com intuito de melhorar o comportamento da peça na direção de maior solicitação (Figura 10).

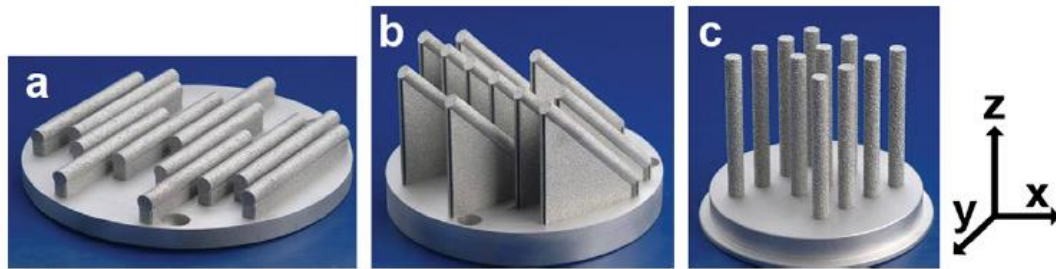


Figura 10- Exemplo da construção de provetes em diferentes planos. A-Horizontal; B-45° de inclinação; C-Vertical [28].

Outro dos motivos que pode levar à inclinação da peça durante o seu fabrico é a orientação das estruturas de suporte para reduzir a distorção das peças ou ainda a redução do tempo de fabrico.

#### 2.5.4. SLM no alumínio

---

Existem vários pontos críticos durante a fundição do alumínio por laser. Primeiramente a tecnologia SLM tem como ponto essencial uma correta distribuição dos pós de metal na camada, o que no alumínio se torna difícil devido à leveza das partículas e baixa fluidez principalmente na presença de humidade.

Outro dos pontos críticos é a alta refletividade (91%) do alumínio, que requer uma potência de laser mais elevada para atingir a sua fundição. Este efeito vai aumentando à medida que as partículas vão solidificando, uma vez que o pó ainda permite bastante absorção de energia, mas à medida que as partículas vizinhas vão fundindo e solidificando a reflexão de energia aumenta. Outra das razões para o aumento da potência do laser é a elevada condutividade térmica do alumínio (comparativamente com outros materiais utilizados na tecnologia SLM, por exemplo aços e titânio), o que leva a uma rápida condução de calor para fora do local do foco do laser. Este fenómeno é mais significante durante a

sinterização da primeira camada, em que o substrato de pó está em contacto com a plataforma sólida [23], [25].

Assim como os outros metais, o processamento do alumínio na tecnologia SLM provoca uma atmosfera muitas das vezes reativa, sendo por isso necessário uma atmosfera controlada com a finalidade de redução de óxido. Na fundição de alumínio por laser, normalmente é utilizado uma atmosfera de azoto, uma vez que a reação do alumínio com o azoto forma nitreto de alumínio, que contribui para uma boa densificação da peça. Existindo também estudos onde foram utilizadas atmosferas de argon e hélio [29].

Apesar de todas as condicionantes abordadas anteriormente, a mais preocupante durante a sinterização das ligas de alumínio é a oxidação. Durante a sinterização, o óxido presente nas partículas dificulta a difusão. Este filme de óxido sobre a superfície do alumínio fundido diminui a sua molhabilidade [23].

### **Alta refletividade e elevada condução térmica**

---

A alta refletividade e elevada condutividade do alumínio pode ser contrariada com o aumento da densidade energética no foco de laser, a fim de garantir a temperatura de fusão suficiente no substrato de alumínio. Este aumento de densidade energética pode ser conseguido principalmente de três formas: i) aumento da potência do laser, ii) diminuição da velocidade de varrimento, iii) variação da distância entre passagens.

Existem diversos estudos onde se aborda a influência destes parâmetros na tecnologia SLM aplicada ao alumínio. A Figura 11 apresenta os resultados de um estudo realizado a uma liga de alumínio 6061 com um laser de 50 W (laser de potência suficiente para obter peças em aço totalmente densas por SLM), com um pó de liga de alumínio 6061 não-standardizado, a uma velocidade de varrimento variável e com uma espessura de camada de 50  $\mu\text{m}$ . Neste estudo foi ainda alterado a distância entre as linhas de passagem. Este estudo foi efetuado no departamento de engenharia da Universidade de Liverpool [23].

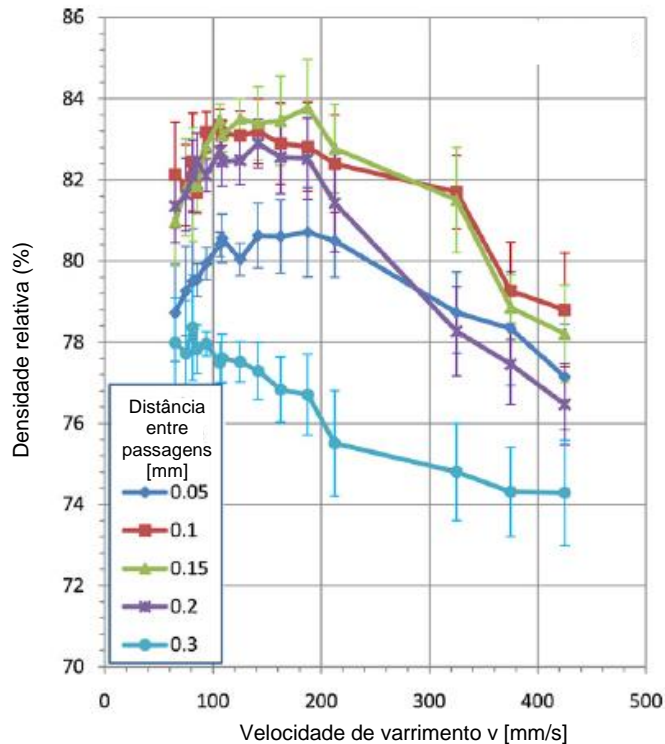


Figura 11- Efeito dos principais parâmetros de SLM na liga de alumínio 6061 com um laser de 50W [23].

É possível observar que com diferentes distâncias entre as linhas de passagem do laser, são obtidas diferentes densidades nos componentes. Existindo por isso um espaçamento ideal entre as linhas de passagem do laser.

Também foi observado, para este alumínio, que o fenômeno de *balling* no local de fundição era um problema, principalmente a baixas velocidades de varrimento. Apesar do aumento da energia transmitida ao substrato, velocidades demasiado baixas podem levar à formação de poros provocados pelo fenômeno de *balling*. Por outro lado, elevadas velocidades de varrimento levam a uma transmissão de energia ao substrato insuficiente, conduzindo a uma fundição incompleta da camada, diminuindo assim a densidade da peça. Devido a estes dois fenômenos, a densidade máxima atingida para a maioria das distâncias entre passagens foi obtida no intervalo de velocidades entre 100 e 200 mm/s. A densidade máxima obtida foi de 83.7 % para 0.15mm de distância entre passagens. Estes resultados são bastantes similares a estudos que foram efetuados anteriormente para a liga AlSi10Mg fundida seletivamente por laser, com um laser de maior potência. O aumento da potência do laser neste estudo para 100 W levou a um aumento da densidade máxima para cerca de 89.5% [23].

Em suma, é necessário utilizar lasers de elevada potência para conseguir obter peças em alumínio totalmente densas. Para ultrapassar os problemas de refletividade e condutividade térmica através do aumento da potência do laser, torna-se ainda necessário controlar o problema relacionado com a formação de óxidos no meio do alumínio já solidificado, o que origina poros na estrutura.

## Oxidação do alumínio

---

Durante o processo de SLM o nível de oxigénio presente na atmosfera controlada do processo deverá ser cerca de 0.1-0.2%, de acordo com a bibliografia este valor é suficientemente baixo para o processamento de aço inoxidável e titânio, provavelmente porque os óxidos são fáceis de romper, misturando-se na zona fundida ou porque evaporam durante a incidência do laser. No entanto, nos componentes de alumínio produzido por SLM é possível observar na última camada a presença de óxidos de alumínio. Estes óxidos observados na última camada podem induzir a que entre camadas também poderão existir camadas de óxido de alumínio, influenciando assim as propriedades dos componentes [23].

No mesmo estudo referido anteriormente, a zona de fratura de um dos provetes de alumínio obtidos por SLM foi analisada com recurso a uma micrografia, onde foi possível observar grânulos de alumínio semelhantes ao pó de alumínio utilizado (Figura 12).

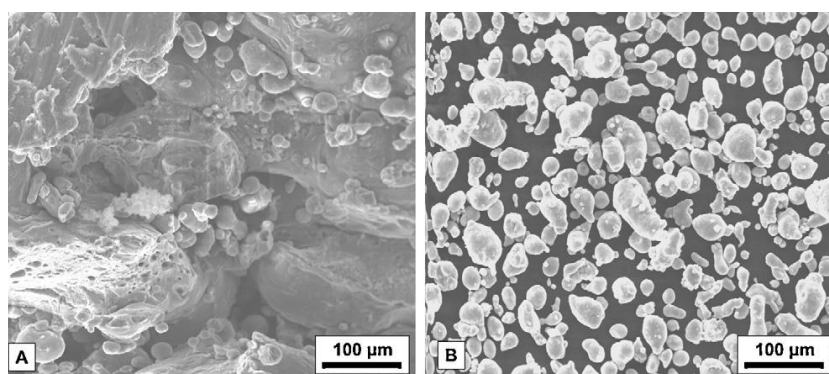
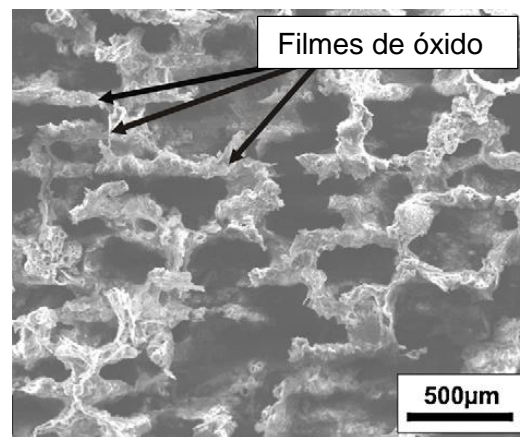


Figura 12- Micrografia à liga de alumínio 6061. A- Superfície da fratura de uma amostra fabricada por SLM; B- Amostra do pó da liga 6061 [23].

A observação da imagem permite verificar a existência de partículas de pó não fundidas na zona de fratura, originando assim uma zona de maior fragilidade da peça. Isto pode ser explicado pelo facto das películas de óxido de alumínio não terem permitido a molhabilidade durante o processo de SLM. Estes poros entre camadas podem ser a explicação de não se ter conseguido atingir peças totalmente densas com lasers de 50 e 100 W.

Para melhor perceber a estrutura destes óxidos nos componentes de alumínio obtidos a superfície transversal dos provetes neste estudo foi atacada com hidróxido de sódio (Figura 13).



*Figura 13- Micrografia da secção transversal do provete da liga de alumínio 6061 fabricada por SLM (Secção atacada com uma solução de NaOH ) [23] .*

É possível observar camadas de óxido entre as linhas de passagem do laser, para além da camada de óxido formada entre cada camada. Estes filmes de óxido nas laterais da passagem do laser podem ser disfarçados com uma variação de 90 graus no sentido da passagem entre camadas.

Os efeitos desta variação da estratégia de varrimento podem ser observados na Figura 14, resultante de um estudo efetuado a uma liga AlSi10Mg, obtida através de uma máquina de SLM da Concept Laser, modificada para um Laser de 200 W. O estudo citado encontra-se na referência bibliográfica [30] .

| Amostra   | A    | B    | C    | D    | E    |
|---|------|------|------|------|------|
| Parâmetros de Varrimento                                  |      |      |      |      |      |
| Potência do Laser (W)                                     | 200  | 200  | 200  | 200  | 200  |
| Velocidade de varrimento (mm/s)                           | 1400 | 1400 | 1400 | 1400 | 1400 |
| Espaçamento entre passagens ( $\mu\text{m}$ )             | 105  | 105  | 105  | 105  | 105  |
| Varrimento unidirecional (Uni) ou bidirecional (Bi)       | Uni  | Bi   | Bi   | Bi   | Bi   |
| Rotação do varrimento entre camadas                       | 0°   | 0°   | 90°  | 90°  | 90°  |
| Utilização de ilhas de Varrimento (5*5mm)                 | Não  | Não  | Não  | Sim  | Sim  |
| Deslocamento das ilhas de varrimento de 1mm entre camadas | Não  | Não  | Não  | Não  | Sim  |
| Densidade relativa de Arquimedes (%)                      | 99.0 | 98.9 | 99.4 | 98.2 | 98.7 |

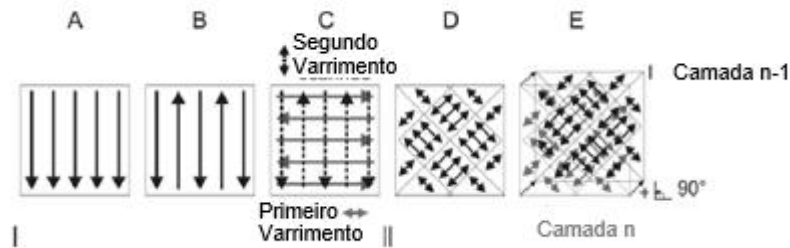


Figura 14- Efeito da estratégia de varrimento na liga ALSi10Mg obtida por SLM [30].

É possível observar que, modificando a estratégia de varrimento entre camadas é possível aumentar a densidade das peças de alumínio mantendo todos ou outros parâmetros inalteráveis. Isto justifica-se pela variação da orientação entre camadas, que minimiza a estrutura de óxido formada nas paredes da passagem do laser.

No entanto, os filmes de óxido inferiores continuam a necessitar de ser quebrados para permitir a união entre camadas [23].

O mecanismo do processo de SLM pode ser considerado como o movimento de uma zona fundida através de uma superfície, com adição de pó metálico na zona da frente e a sua solidificação à sua retaguarda. Para obter uma peça totalmente densa é necessário que a parte sólida tenha uma refusão com a parte fundida, para que esta fique também envolvida por líquido e funda também. No entanto, nas ligas de alumínio existe uma camada de óxido sólido aderente formado tanto na base sólida como na zona fundida. E mesmo quando a quantidade de calor é suficiente para fundir as partes sólidas, as partes líquidas ficam separadas por dois filmes oxido [23].

É por isso necessário que exista um mecanismo de trabalho que perturbe os óxidos por agitação no metal fundido, de modo a expor o metal não oxidado e que este se envolva com o metal fundido.

A mais provável explicação para o aumento de densidade com o aumento da potência do laser é ocorrerem efeitos da força de Marangoni na zona de metal fundido pelo laser (Figura 15) [23].

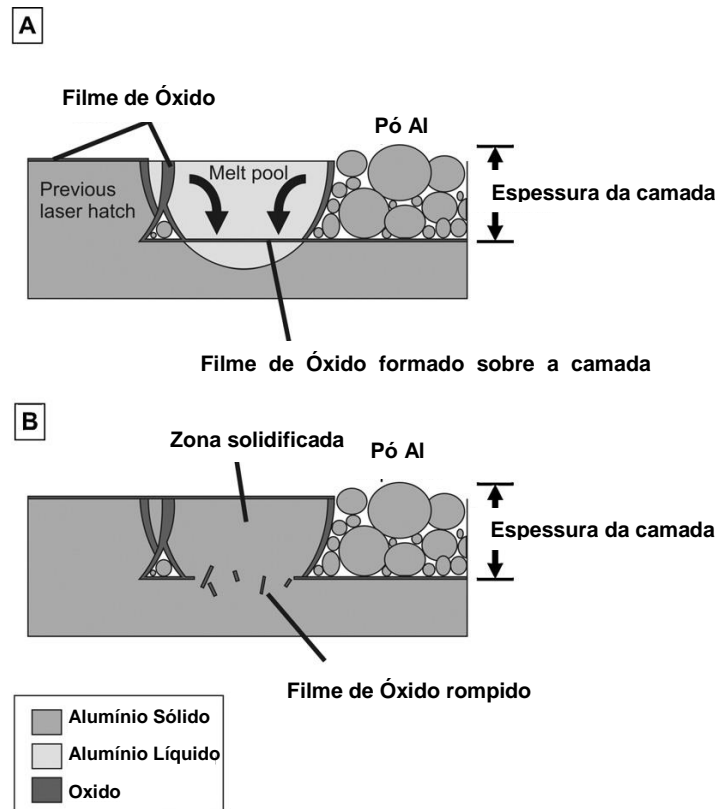


Figura 15- Convecção de Marangoni na zona de fundição. B-Dissociação dos óxidos e solidificação da zona fundida [23].

Durante a passagem do laser no substrato de alumínio este provoca a vaporização da película de óxido sobre o topo da zona fundida, que vai provocar o aumento da tensão superficial em relação aos lados. Combinado este efeito com o efeito do perfil de temperatura irá produzir agitação dentro da zona fundida, o que provavelmente rompe os filmes de óxidos que separa as duas camadas, mas não nos lados.

O sucesso do processamento do alumínio e suas ligas com potências de laser muito elevadas pode ser então justificado com as alterações do tamanho da zona fundida e com as mudanças nos fluxos de líquido dentro do banho de fusão com as temperaturas mais elevadas induzidas [23].

Existem vários estudos onde se refere que foi possível atingir densidades superiores a 99% em peças de alumínio com lasers com uma potência a partir dos 200 W [25] , [30].

A otimização dos parâmetros da tecnologia SLM, como visto anteriormente, tem influência direta na densidade da peça. Tipicamente, uma maior densidade da peça conduz a uma maior resistência mecânica pois a ausência de poros nos componentes não origina zonas de maior fragilidade ou mesmo zonas de iniciação de fendas devido a fadiga.

As ligas de alumínio obtidas por SLM têm ainda a particularidade de possuir uma microestrutura cristalina celular bastante fina, devido às altas taxas de transferência de calor envolvidas neste processo. Por esse motivo, várias ligas obtidas por SLM possuem maior dureza e resistência mecânica do que a sua liga equivalente fundida, sem tratamento térmico [30], [25].

Uma vez ajustados os parâmetros para obtermos peças totalmente densas, estes irão igualmente influenciar o acabamento superficial das peças, a tolerância dimensional e na produtividade das máquinas de SLM. Também no estudo apresentado na referência [25] é possível observar a influência da velocidade e da potência do laser no acabamento superficial da peça. Os resultados obtidos nesse estudo podem ser observados na Figura 16.

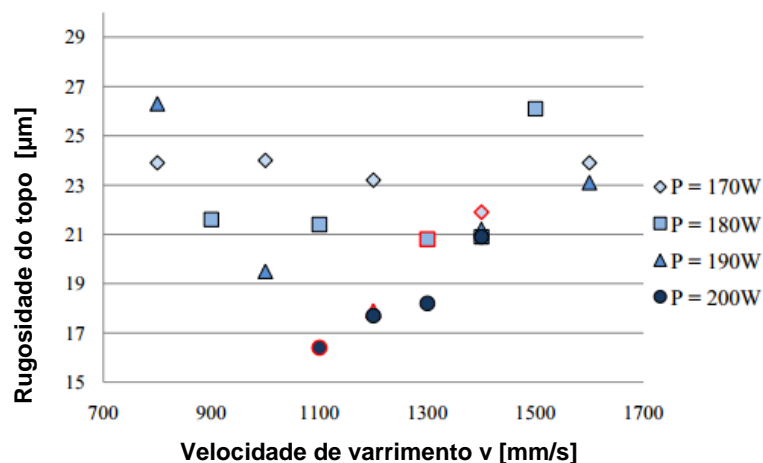


Figura 16- Rugosidade média da superfície do topo de componentes em AlSi10Mg produzidas por SLM com diferentes potências de laser e velocidades de varrimento [25].

A qualidade superficial pode ser um requisito importante em alguns componentes para a indústria automóvel. Na Figura 16 é possível observar que para uma determinada potência de laser o valor de rugosidade é mínimo para uma certa velocidade de varrimento. Lasers de maior potência com baixas velocidades otimizam o processo em relação à rugosidade

(baixa rugosidade). Uma redução da densidade energética, vai provocar uma melhoria no acabamento superficial, desde que a zona fundida se mantenha estável, pois assim vai haver uma redução da dimensão da zona fundida e uma diminuição das tensões residuais induzidas [25].

Devido a estas limitações, nem todos os equipamentos de SLM estão preparados para o processamento de alumínio, sendo necessário que estes possuam lasers suficientemente potentes para a fusão do alumínio e ainda que estejam preparados para criar uma atmosfera de azoto que permita o processamento adequado das ligas de alumínio. Por exemplo, os equipamentos M2 e XLine 1000R da Concept Laser permitem o processamento de ligas de alumínio.

## **2.5.5. Avanços tecnológicos da tecnologia SLM**

---

A tecnologia SLM é amplamente utilizada no fabrico rápido de peças únicas ou na produção de pequenas séries. Só assim é que a tecnologia é economicamente viável em relação aos processos de fabrico convencionais. Para a tecnologia SLM poder ser aplicada em larga escala, no fabrico de grandes séries de peças, é necessário aumentar a produtividade das máquinas SLM mantendo a mesma qualidade nos componentes produzidos [18].

O tempo de produção de uma máquina SLM pode ser definido pela equação número 5 (secção 2.3.3). A espessura da camada e a velocidade de varrimento utilizadas são influenciadas, entre outros fatores, pela potência do laser. A distância entre passagens é limitada pelo diâmetro do foco do laser, que deverá ser cerca de 0.7 vezes o diâmetro do foco [18].

Para tornar possível a aplicação da tecnologia SLM na produção de grandes séries é necessário aumentar a produtividade do processo, para isso é necessário aumentar a potência do laser para assim ganhar flexibilidade nos parâmetros que influenciam a produtividade do processo SLM. Nas ligas de alumínio é possível aumentar a potência do laser até 1kW, mantendo o diâmetro de foco (200  $\mu\text{m}$ ). Este aumento de densidade energética é possível devido à elevada condutividade térmica das ligas de alumínio, comparativamente às ligas níquel ou aços, não resultando em salpicos de metal fundido. Nos aços é possível aumentar a potência do laser para 1 kW, aumentando o diâmetro do

foco até 1000  $\mu\text{m}$ , diminuindo assim a densidade energética do processo [18].

A condição limite para aumentar a produtividade do processo SLM é a produção de peças funcionais com características semelhantes aos processos de fabrico tradicionais, ou seja densidades superiores a 99.5%.

Para encontrar um compromisso entre a produtividade do processo SLM em componentes de alumínio e a qualidade das peças, um grupo de investigadores da *Fraunhofer Institute for Laser Technology* da Alemanha levou a cabo um estudo onde foram produzidos provetes da liga AlSi10Mg com um laser de potência variável entre 300W e 1000W, com um diâmetro de foco de 200  $\mu\text{m}$  e uma espessura de camada de 50  $\mu\text{m}$ . Variou-se ainda a velocidade de varrimento do laser e a distância entre passagens. Os resultados das densidades obtidas nos provetes para as várias combinações de parâmetros encontram-se apresentados na Figura 17.

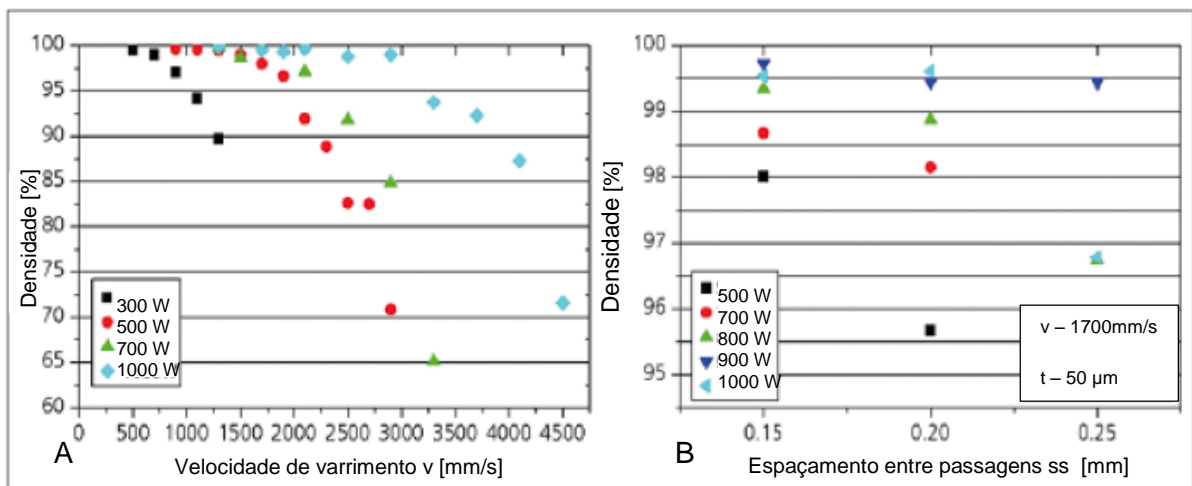


Figura 17- Densidade dos provetes de AlSi10Mg obtidos por SLM. A-Variação da velocidade; B - Variação do espaçamento entre passagens [18].

A utilização de um laser de 300W permite a obtenção de peças com uma densidade próxima dos 100 %, com uma velocidade de varrimento de 500 mm/s. Aumentando a potência do laser para 500 W é possível utilizar uma velocidade de 1200 mm/s. O laser de 1000 W permite velocidades de 2200 mm/s, obtendo uma produtividade do processo SLM de 16  $\text{mm}^3/\text{s}$  [18].

No caso da variação da distância entre linhas (150, 200 e 250  $\mu\text{m}$ ) com uma velocidade de varrimento de 1700mm/s. Verifica-se que é possível obter densidades próximas de 100% com uma distância entre passagens de 200  $\mu\text{m}$ . Ajustando a potência do laser para 900W e utilizando uma velocidade de 1700 mm/s é possível obter uma produtividade de 21 $\text{mm}^3/\text{s}$  em ligas de alumínio [18].

Este aumento de densidade energética vai induzir naturalmente mais tensões residuais na peça e um aumento da rugosidade no acabamento superficial. No, entanto estas tensões podem ser reduzidas com o aquecimento da peça durante o processo. E o acabamento superficial pode ser melhorado com a utilização de densidades energéticas menores nos limites de cada camada.

## 2.6. Seleção da liga de alumínio

---

A liga de alumínio fundida por laser estudada ao longo deste projeto será a liga de fundição classificada pela norma EN AC de AlSi10Mg (a), sendo a liga equivalente segundo a “Aluminium Assotiation” a liga A360.0 F.

Esta liga foi escolhida para este estudo pois é amplamente disponibilizada pelos fabricantes de máquinas de SLM, possui boa soldabilidade quando sujeita a reparação, é tratável termicamente mantendo excelente condutividade térmica de cerca de 113W/m.K e possui uma excelente resistência à corrosão. A boa soldabilidade é induzida pela composição hipoeutéticas de Al e Si com o eutético predominante, pois possui um pequeno intervalo de solidificação, tornando-se bastante interessante para o seu uso na tecnologia SLM [30].

A adição de pequenas quantidades de elementos de liga como Mg (0.3-0.5% do peso total) induz o endurecimento e o aumento da resistência dos componentes quando sujeitos a envelhecimento natural ou artificial por precipitação de Mg<sub>2</sub>Si [30].

Esta liga tem ampla utilização na indústria aeronáutica e automóvel, esta presente em periféricos do motor, tampas e peças estruturais de elevada resistência quando sujeitas a tratamentos térmicos, normalmente as peças são injetadas a baixa pressão em moldes permanentes [30] [31] .

## 3. Caracterização microscópica e mecânica

---

Todos os ramos de engenharia, em particular os relacionados com dimensionamento de estruturas e/ou componentes dependem diretamente de propriedades mecânicas determinadas por ensaios. Estes ensaios devem ser realizados seguindo normas, de modo a evitar procedimentos incorretos.

Cada material possui características próprias, tais como, por exemplo a dureza, resistência à tração, limite de fadiga, elasticidade etc. Estas características são influenciadas pela natureza do material, constituintes químicos, tratamentos térmicos, entre outros. Uma vez que a liga de alumínio AlSi10Mg produzida por fundição seletiva por laser é obtida em condições totalmente diferentes das ligas fabricadas por fundição em molde permanente, as suas propriedades mecânicas também irão ser diferentes, podendo estas diferenças ser significativas e consideradas na fase de projeto e desenvolvimento de componentes.

De modo a proceder à comparação das suas propriedades, foram realizados ao longo deste projeto ensaios em diversas condições à liga de alumínio obtida em molde permanente e para a liga obtida por fundição por laser, sendo também efetuada uma análise a cada uma das microestruturas.

### 3.1. Caracterização Microscópica

---

A liga de alumínio-silício AlSi10Mg possui uma microestrutura hipoeutéticas ( $9 < \%Si < 11$ ), formada por uma fase primária de alumínio com morfologia dendrítica. Os vazios entre os ramos dendríticos são preenchidos por fases intermetálicas e pelo constituinte eutético [10].

Para as ligas de alumínio eutéticas a solidificação ocorre através da formação de dendrites, que irão crescer no intervalo de solidificação, formando uma rede dendrítica após a solidificação, responsável pela formação da estrutura metalográfica das ligas (Figura 18 A). As dendrites de solução sólida de alumínio (fase  $\alpha$ ) apresentam no seu contorno a fase eutética de silício ( $\alpha+\beta$ ) conforme se pode observar pela Figura 18 B.

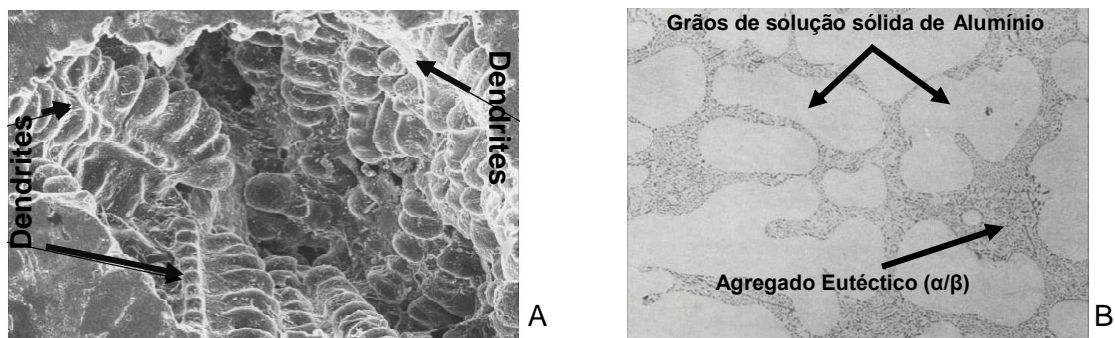


Figura 18- Exemplo de estrutura dendrítica e da microestrutura de uma liga de alumínio hipoeutéticas atacada com Nital (2%). A- Dendrites (500x); B- Microestrutura (100x) [10].

As fases apresentam-se como cristais ou grãos da microestrutura, que variam em tamanho, forma e distribuição. A sua distribuição, tamanho e forma variam de acordo com a sua constituição e condições de solidificação. As propriedades mecânicas dos materiais dependem fortemente desta microestrutura. Torna-se então necessário perceber de que forma varia esta microestrutura nas ligas AlSi10Mg obtidas por SLM e por fundição em molde permanente.

## 3.2. Caracterização Mecânica

---

### 3.2.1. Ensaio de Dureza

---

A dureza de um material pode ter variadas interpretações. Pode ser entendida como a propriedade mecânica que define a resistência dos materiais a ações que se exercem sobre a sua superfície, tais como o desgaste, a deformação plástica, penetração, o corte por arranque apana, entre outros. Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas para medição de dureza, as quais estão hoje em dia normalizadas e permitem quantificar de forma comparativa a dureza de um material [32].

Para a obtenção da dureza nas ligas em estudo foi realizado o ensaio de penetração de micro dureza de Vickers, onde o penetrador (Pirâmide triangular, Figura 19) é comprimido contra o material a ensaiar, com uma força bem determinada. Após a aplicação da força medem-se as diagonais da indentação e o valor de dureza é calculado através da equação 6.

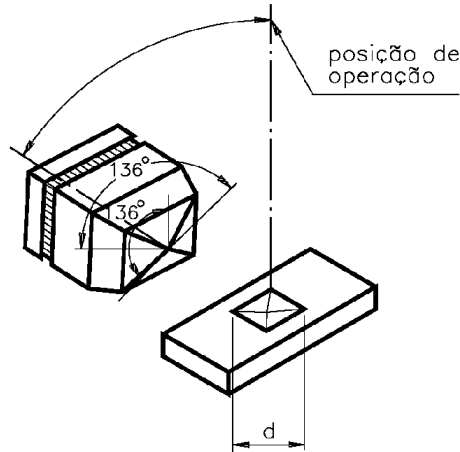


Figura 19- Ensaio de dureza de Vickers [32].

$$HV = \frac{\text{Força de ensaio}}{\text{Área de impressão}} = \frac{2 * \text{Força de ensaio} * \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{D^2} = 1.8544 * \frac{F}{D^2} \quad (6)$$

### 3.2.2. Ensaio de tração

---

O ensaio de tração é dos ensaios mecânicos mais importantes realizados para a caracterização de materiais, pois permite obter importantes propriedades utilizadas em fase de projeto de novas componentes e estruturas, nomeadamente, a tensão de rutura do material, a tensão limite de elasticidade, o módulo de elasticidade, entre outras.

Geralmente o ensaio é realizado num corpo de prova de dimensões e formas padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou reproduzidos, se necessário. Este corpo de prova é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as correspondentes deformações no material. A força aplicada é contabilizada pela máquina e o corpo é levado até à sua rutura [33].

## Tensão e deformação no ensaio de tração convencional

---

No ensaio de tração convencional procede-se ao registo da curva tensão-deformação através das medições da carga aplicada e do alongamento do provete.

A tensão é definida genericamente como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área. A deformação é a variação de uma dimensão quando o corpo é sujeito a um esforço [33].

A tensão média ( $\sigma$ ) sofrida pelo provete durante um ensaio de tração é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{\text{Força de ensaio (F)}}{\text{Área da secção inicial do provete (S}_0\text{)}} \quad (7)$$

A deformação ( $\epsilon$ ) é a deformação linear média que se determina dividindo o deslocamento das amarras da máquina de ensaio ( $\Delta L$ ), pelo comprimento inicial de referência do provete ( $L_0$ ).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (8)$$

Nos ensaios realizados pretende-se obter a tensão de rotura e a tensão limite de elasticidade convencional. O módulo de elasticidade foi obtido com recurso ao ensaio DMA (Análise Dinâmico Mecânica).

A tensão de rotura ( $\sigma_R$ ), é obtida pelo quociente da força máxima registada pela máquina de ensaio ( $F_{\text{máximo}}$ ) pela área da secção inicial do provete.

$$\sigma_R = \frac{F_{\text{máximo}}}{S_0} \quad (9)$$

Para obter a tensão limite elasticidade, pode-se considerar dois tipos de curva de tração-deformação, conforme se verifique ou não o fenómeno de cedência na transição do domínio elástico para o plástico. Nas curvas onde é verificado este patamar a tensão limite

de elasticidade é retirada através da tensão superior e inferior do patamar de cedência. Para as curvas onde não é visível esta transição é possível calcular a tensão limite de elasticidade proporcional, determinada a partir da curva de tensão-deformação, traçando-se uma reta paralela à zona retilínea da curva, passando pela abcissa correspondente à deformação convencionalmente prescrita (0.2%). O ponto de interceção desta reta com a curva tensão-deformação corresponde à tensão limite de elasticidade convencional ( $\sigma_{c(0.2\%)}$ ), Figura 20.

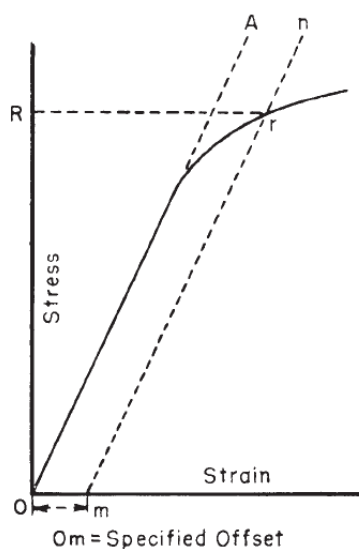


Figura 20-Método de determinação da tensão limite de elasticidade com offset [32].

### 3.2.3. Ensaio DMA

---

Com o intuito de estudar a evolução do comportamento mecânico das duas ligas de alumínio a diferentes temperaturas, procedeu-se a ensaios DMA. O funcionamento do ensaio DMA consiste na aplicação de pequenas deformações a uma amostra de geometria conhecida. A amostra pode ser sujeita a uma força ou tensão controlada. Para uma força conhecida, a amostra terá uma determinada deformação. No ensaio de DMA a força ocorre de forma sinusoidal. O grau de deformação está relacionado com a rigidez do material. O motor da máquina aplica uma força na forma de senoide no provete através de um veio (Figura 21A). Em seguida é medido a amplitude da deformação provocada na amostra, medindo o pico de deformação na onda e o desfasamento entre as ondas de tensão e deformação, podem ser calculadas grandezas como módulo de elasticidade e o amortecimento (Figura 21B).

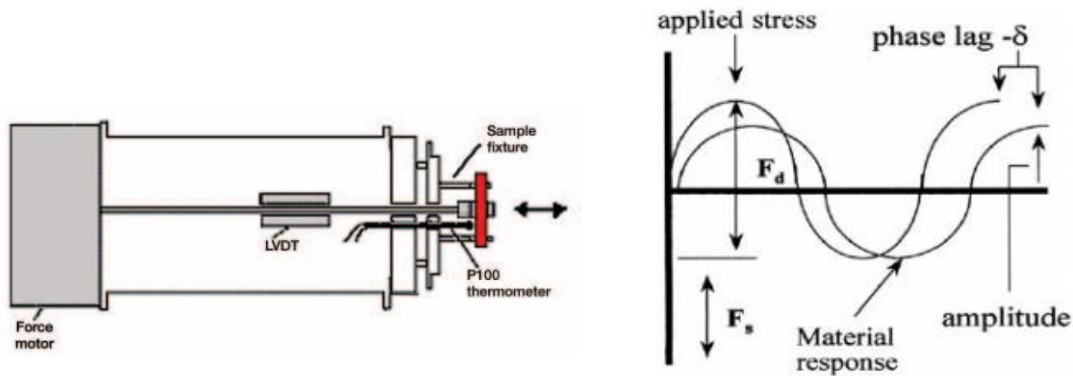


Figura 21- A-Exemplo de mecanismo de ensaio de DMA [34]; B-Ondas sinusoidais de tensão e deformação no DMA [34] .

O módulo de elasticidade medido no ensaio de DMA, no entanto, não é exatamente igual ao módulo de elasticidade da curva de tensão-deformação clássica, no ensaio de DMA, um módulo complexo ( $E^*$ ), um módulo de elasticidade ( $E'$ ) e um módulo imaginário (perda) ( $E''$ ) são calculados a partir da resposta do material à onda sinusoidal. Sendo conceptualmente semelhante, o módulo de elasticidade da curva tensão-deformação e o módulo de elasticidade ( $E'$ ) não têm exatamente o mesmo valor [34].

Estes diferentes módulos permitem uma melhor caracterização do material, uma vez que podemos examinar a capacidade de armazenamento de energia ( $E'$ ), a sua capacidade para perder energia ( $E''$ ), e a razão destes efeitos ( $\tan \delta$ ), ou seja o amortecimento [34]:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (10)$$

O amortecimento ( $\tan \delta$ ) é a dissipação de energia de um material sujeito a uma carga cíclica, mensurando a capacidade de absorção de energia por parte de um material. Este pode variar com o estado do material, a sua temperatura e com a frequência. Os valores dos módulos também podem variar com a temperatura. Esta variação do comportamento dos materiais pode ser observada com as alterações do  $E'$  ou da curva de amortecimento, uma vez que as máquinas DMA permitem ter uma atmosfera de ensaio com temperatura controlada.

### 3.2.4. Ensaio de Fadiga

---

Designa-se por fadiga o fenómeno de rotura progressiva dos materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão e deformação. O estudo deste fenómeno é de extrema importância na conceção de máquinas e estruturas visto que a grande maioria das roturas observadas em serviço envolvem fadiga, pois durante o serviço as tensões de rotura e mesmo a tensão limite de elasticidade não são ultrapassadas e os componentes fraturam [35].

O mecanismo da fadiga envolve as seguintes fases sucessivas: nucleação ou iniciação da fissura de fadiga, propagação dessa fissura, e rotura final. A iniciação da fissura de fadiga inicia-se normalmente à superfície do corpo, visto que aí se verificam zonas de concentrações de tensões máximas (variações de secções, riscos, fissuras, etc.). Uma vez iniciada a fissura esta tende a propagar-se em três fases (Figura 22).

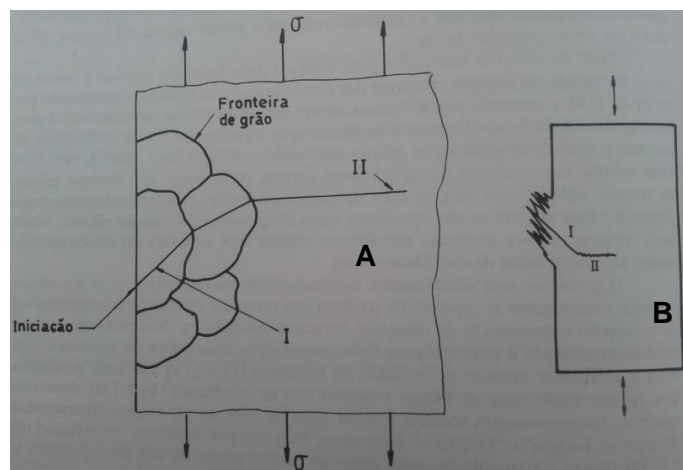


Figura 22- A-Iniciação e fase I e II de uma fenda de fadiga; B- Representação esquemática de intrusões e extrusões [35].

A fase I consiste num crescimento de 45 graus relativamente à direção da solicitação, que corresponde à propagação do defeito inicial em planos sujeitos a elevadas tensões de corte. Na fase II a fissura tende a propagar-se perpendicularmente à solicitação, comportamento provavelmente justificado pelo valor da tensão normal. Finalmente, atingindo um valor crítico no comprimento da fissura, dá-se a rotura instável final. A fase II normalmente apresenta estrias perpendiculares à direção de propagação, especialmente em materiais dúcteis.

O número de ciclos necessários para a falha de um componente ou provete depende de diversos fatores, tais como os níveis de tensão, o tipo de solicitação (tensões alternadas, repetidas e regulares ou aleatórias), o ambiente, a temperatura, o estado do material e o estado da superfície [32].

De modo a prever as falhas de um componente em serviço é necessário obter resultados dos ensaios representativos das condições de serviço. Uma das formas mais comum de apresentação dos resultados dos ensaios de fadiga é a apresentação das chamadas curvas de Wholer ou S-N (Figura 23) em gráficos de tensão (S) versus o número de ciclos ocorridos até à falha (N). A tensão apresentada poderá ser a tensão máxima, amplitude da tensão ou a gama de tensão. A cada curva corresponde uma determinada tensão média, dependente da relação de tensão (R) utilizada, que é determinada através do quociente entre a tensão máxima e mínima da carga cíclica.

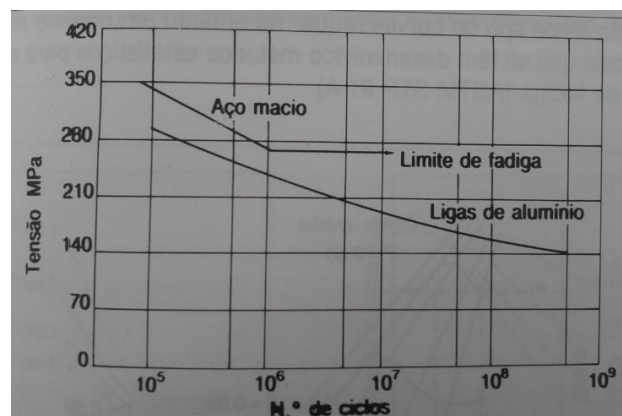


Figura 23- Curvas S-N - Materiais Ferroso e Ligas de alumínio [32].

As curvas S-N dos materiais como o aço macio, apresentam para baixos valores de tensão uma assíntota que corresponde à denominada tensão limite de fadiga, tensão abaixo da qual os provetes presumivelmente suportariam um número infinito de ciclos. A maioria dos materiais não ferrosos, tais como as ligas de cobre, alumínio e manganésio, não apresentam estas curvas com um patamar horizontal. Nestes casos assume-se uma tensão limite de fadiga para um número elevado de ciclos, na ordem dos 10<sup>8</sup> ciclos [32].

Como procedimento para determinar as curvas S-N, ensaia-se um provete a uma tensão relativamente elevada, na ordem dos dois terços da tensão de rotura do material, de modo a que a falha do provete se verifique a um número reduzido de ciclos. Os provetes seguintes são ensaiados a tensões decrescentes até que 2 ou 3 provetes não atinjam a

rotura ao fim de um número de ciclos definidos [32]. É possível determinar uma curva S-N média com cerca de 10 a 12 provetes, embora seja reconhecida a dispersão de resultados quando ensaiados diversos provetes com a mesma tensão [32].

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 4. Metodologia e resultados experimentais

---

### 4.1. Amostras das Ligas

---

#### 4.1.1. Liga AlSi10Mg obtida por fundição em molde permanente

---

As amostras da liga AlSi10Mg fundida convencionalmente utilizadas no nosso estudo foram disponibilizadas pela empresa FUNDIVEN SA, especialista em injeção de componentes em alumínio. As amostras de AlSi10Mg (EN AC 43000) foram injetadas em moldes permanentes metálicos, sem qualquer tratamento térmico posterior (Figura 24).



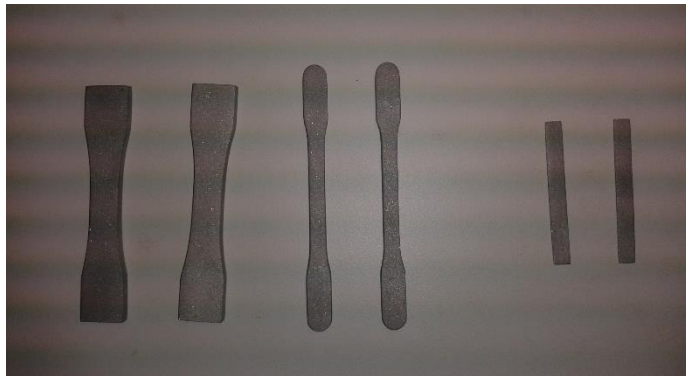
*Figura 24- Amostras da liga AlSi10Mg obtidas por fundição convencional.*

#### 4.1.2. Liga AlSi10Mg obtida por SLM

---

Para obtenção das amostras de AlSi10Mg produzidas por SLM estabeleceu-se o contacto com a empresa Seroplaste, representante em Portugal do fabricante CONCEPT LASER. Este fabricante disponibiliza para processamento a liga de alumínio CL31 AL segundo designação própria, a qual equivale à liga EN AC AlSi10Mg.

Foi efetuada uma parceria com a empresa com intuito de esta nos fornecer os provetes necessários para os ensaios mecânicos da liga obtida por SLM (Figura 25).



*Figura 25- Provetes de AISI10Mg obtidos por SLM.*

Os provetes foram então construídos horizontalmente numa máquina de SLM M2 Cusing da Concept Laser, equipada com um laser de 400W. Utilizando uma espessura de camada de 45  $\mu\text{m}$ , uma estratégia de varrimento em ilhas com uma rotação entre elas de 90 graus de camada para camada e um suporte não sujeito a qualquer aquecimento. Estes provetes não foram sujeitos a qualquer tratamento térmico pós-processamento para assim ser possível a comparação dos dois processos de fabrico.

## 4.2. Plano de ensaios

Como metodologia de trabalho foi definido um plano de ensaios (Figura 26) onde é identificada uma sequência lógica dos ensaios mecânicos a realizar nos provetes fundidos e processados por SLM.

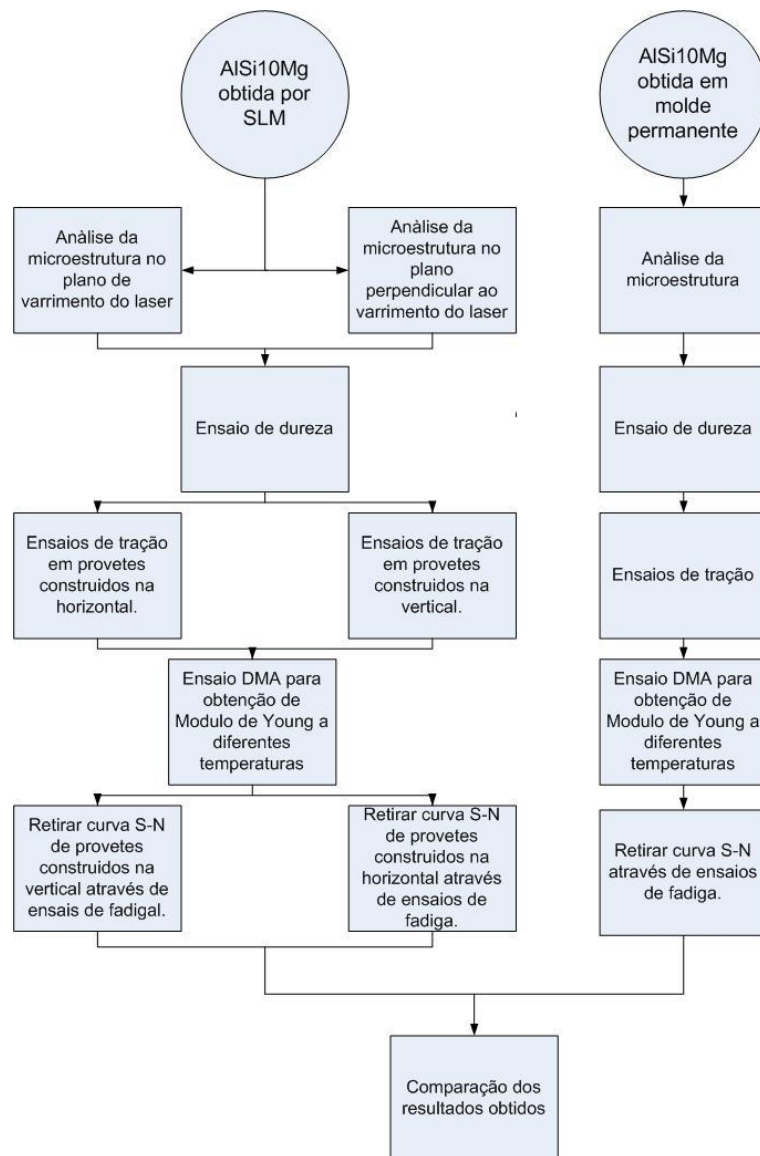


Figura 26- Diagrama inicial de ensaios.

A análise às microestruturas das ligas será a primeira a ser efetuada, para de seguida facilitar a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

O objetivo deste plano é analisar o comportamento da liga obtida por SLM em planos diferentes de construção, visto este ser um material anisotrópico. E de seguida comparar o seu comportamento com o da liga obtida por fundição convencional. O número de provetes necessários para o cumprimento deste plano é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13-Provetes de ensaios necessários para plano inicial.

| Liga   | Ensaio | Provetes Necessários |
|--|--------|----------------------|
| <b>AlSi10Mg obtida em molde permanente.</b>  | Tração | 2                    |
| <b>AlSi10Mg obtida em molde permanente.</b>  | Fadiga | 12                   |
| <b>AlSi10Mg obtida em molde permanente.</b>  | DMA    | 4                    |
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM (Horizontal).</b> | Tração | 2                    |
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM (Horizontal).</b> | Fadiga | 12                   |
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM (Vertical).</b>   | Tração | 2                    |
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM (Vertical).</b>   | Fadiga | 12                   |
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM.</b>              | DMA    | 4                    |

## 4.2.1. Replaneamento dos Ensaios

Após apresentação do plano inicial de ensaios à empresa Seroplaste chegou-se à conclusão que a construção deste número de provetes em SLM era bastante dispendioso, sendo incompatível com o contributo da empresa para a realização deste projeto, bem como demasiado dispendioso para a ESTG/IPLeiria. Os provetes fabricados na vertical levariam bastante tempo de produção em máquina, pelo que se optou pela sua não construção. Foi então acordado a construção de apenas 2 provetes para cada tipo de ensaio, construídos na horizontal (Tabela 14).

Tabela 14-Provetes disponibilizados para ensaio obtidos por SLM.

| Liga   | Ensaio | Provetes Necessários |
|--|--------|----------------------|
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM (Horizontal).</b> | Tração | 2                    |
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM (Horizontal).</b> | Fadiga | 2                    |
| <b>AlSi10Mg obtida por SLM.</b>              | DMA    | 2                    |

Perante este facto houve necessidade de redefinir o plano de ensaios a realizar. Deste modo, apenas é possível obter a comparação de comportamento da liga AlSi10Mg obtida por SLM numa direção, com a liga AlSi10Mg obtida em molde permanente.

Já no ensaio de fadiga apenas será possível obter um ponto da curva S-N para iguais níveis de tensão. As conclusões retiradas serão incompletas comparativamente às inicialmente previstas. A Figura 27 apresenta o novo plano de ensaios a cumprir.

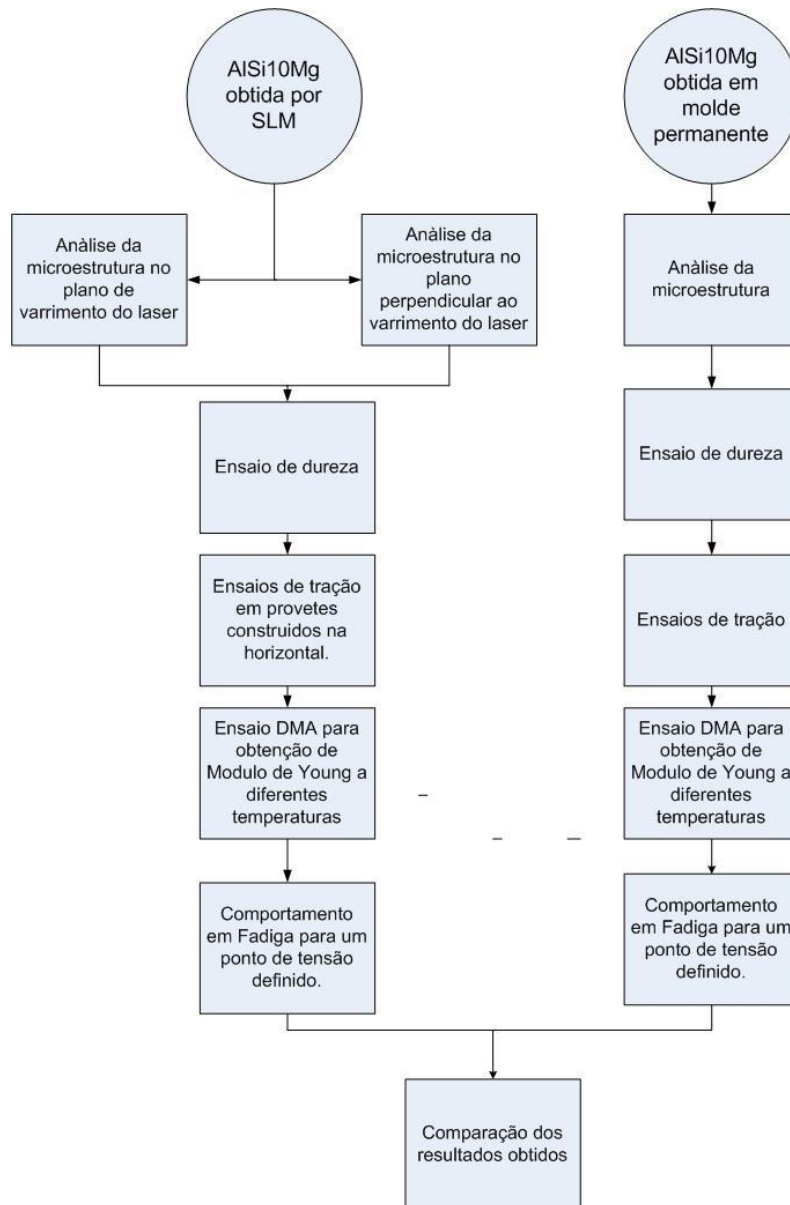


Figura 27- Diagrama de ensaios final.

## 4.3. Procedimento experimental

---

### 4.3.1. Análise microscópica

---

De modo a possibilitar a observação das diferenças apresentadas na microestrutura da liga fundida por laser e da liga obtida em molde permanente, procedeu-se à preparação de amostras para observação microscópica.

O procedimento seguido foi o normalmente utilizado para estas ligas de alumínio [10], [36]:

- Amostras da liga AlSi10Mg obtida por SLM (secção transversal e longitudinal) e da liga obtida em molde permanente foram embutidas numa solução de resina, catalisador e acelerador (Figura 28A), para melhor manuseio e controle no momento do polimento;
- Seguidamente as amostras foram polidas, com lubrificação a água, com abrasivos com granulometria de 500, 800, 1000 e 1200 através de uma polidora e um rotor de força (Figura 28B), com uma força aplicada de 5N. A variedade da granulometria dos abrasivos destina-se a evitar riscos permanentes no final do polimento. De notar que a rotação do rotor em simultâneo com a polidora, proporciona um polimento em duas direções perpendiculares entre si evitando a predominância de riscos em apenas uma direção;
- Seguiu-se um polimento com uma almofada para lixamento e polimento de metais ferrosos e não ferrosos, com recurso novamente à polidora e ao rotor de força;
- Para revelação da microestrutura, a superfície foi atacada quimicamente com o reagente Tucker (45ml HCl, 15 ml HNO<sub>3</sub>, 15 ml HF e 25ml de H<sub>2</sub>O), durante 5 segundos;
- A observação efetuou-se através do microscópio Zeiss AxioTech, equipado com máquina fotográfica Cannon PowerShot A640 (Figura 28C).

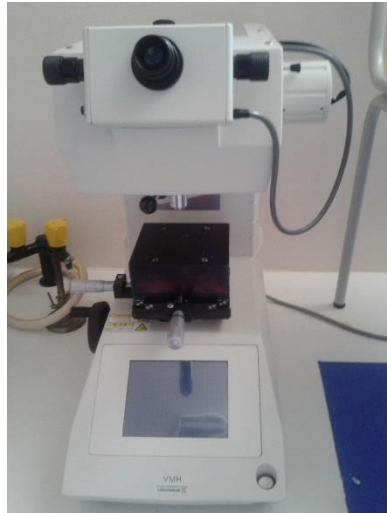


Figura 28- Preparação de amostras para análise da microestrutura. A-Amostra embutida em resina; B- Polidora e rotor de força; Microscópio Ótico utilizado.

### 4.3.2. Micro Dureza

---

Foram realizados ensaios de micro dureza Vickers, os quais são fáceis e rápidos, e pouco suscetível a erros humanos, em particular nos aparelhos modernos e digitais. As indentações são pequenas, sendo que na maior parte dos casos permite a utilização das amostras para outros ensaios [32].



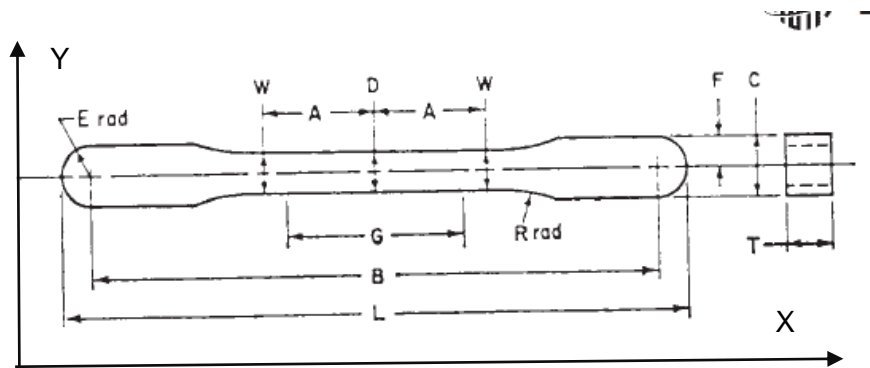
*Figura 29- Equipamento de micro dureza de Vickers Shimadzu HMV-2..*

O ensaio realizou-se em amostras polidas com abrasivos de granulometria 1200 (provetes de fadiga, na zona de aperto), através do equipamento de micro dureza Shimadzu HMV-2 (Figura 29), com uma força de 4.903N aplicada durante 10 segundos.

Efetuando-se ensaios de dureza à liga obtida por SLM e em molde permanente. Em cada um dos casos foram efetuadas 10 medições, tendo sido ignorado o valor mínimo e máximo. Foi calculada a média dos valores para cada uma das amostras ensaiadas.

### 4.3.3. Ensaio de tração

Os ensaios de tração realizaram-se com provetes de dimensões e geometria adequadas para a metalurgia do pó (Figura 30), segundo a norma para ensaios de tração a deslocamento constante ASTM E8.



|   | [mm]         |
|---|--------------|
| <b>G- Comprimento de ensaio</b>                     | 25.4 ± 0.07  |
| <b>D- Largura da secção de ensaio</b>               | 5.72 ± 0.03  |
| <b>W – Largura no fim da secção reduzida</b>        | 5.97 ± 0.03  |
| <b>T- Espessura Compactada</b>                      | 4            |
| <b>R- Raio do Filete</b>                            | 25.4         |
| <b>A- Metade do comprimento da secção de ensaio</b> | 42.33        |
| <b>B- Comprimento com placas de aperto</b>          | 80.950±0.025 |
| <b>L- Comprimento total</b>                         | 89.64±0.025  |
| <b>E-Raio de acabamento</b>                         | 4.34.3±0.025 |
| <b>F-Metade da largura da zona de aperto</b>        | 4.34±0.025   |

Figura 30- Dimensões do provete do ensaio de tração.

Para a obtenção desta geometria nas amostras de AlSi10Mg obtidas por fundição em molde permanente, procedeu-se ao corte das amostras em várias placas de 4 mm de espessura por electro erosão por fio (Figura 31A). Em seguida foi maquinada a geometria final, segundo o plano XY, por uma máquina de comando numérico Roland MDX-650 (Figura 31B).

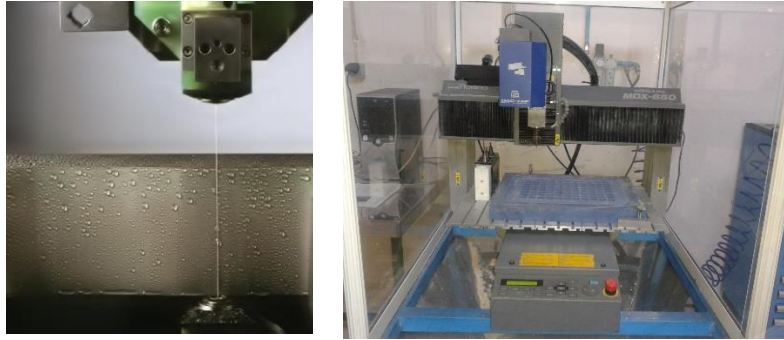


Figura 31- A-Imagem ilustrativa de Corte de Electroerosão por fio [37]; B-Maquinação Roland MDX-650.

Os provetes na liga AISI10Mg obtidos por SLM foram construídos camada a camada, segundo o plano XY, com as dimensões e formas final. Foram posteriormente separadas da plataforma de construção por electro erosão por fio.

Seguindo-se os procedimentos da norma ASTM E8 os dois provetes de cada liga foram sujeitos ao ensaio de tração numa máquina de ensaio Zwick Z100 de 10 kN (Figura 32), a uma velocidade constante de 10mm/s e uma pré-carga de 5N.



Figura 32- Equipamento de ensaio de tração Zwick Z100.

#### 4.3.4. Ensaio DMA

---

Os ensaios DMA realizaram-se em dois provetes de cada liga, cujas dimensões e geometria estão apresentadas na Figura 33, tendo em conta as dimensões do suporte do equipamento DMA Triton Tritec 200 (Figura 34).

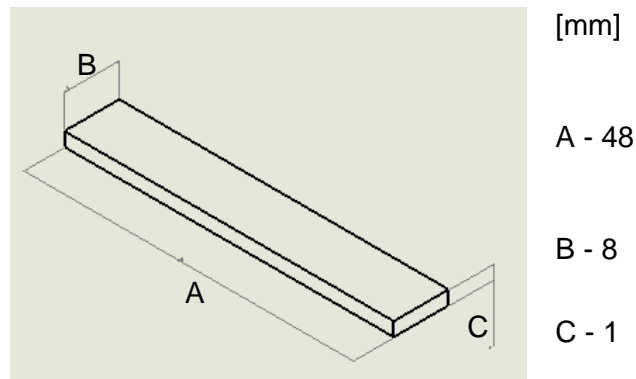


Figura 33- Dimensões de provetes para ensaios de DMA.

Para obter esta placa geométrica a partir das amostras de AISi10Mg produzidas em molde permanente, procedeu-se ao corte das amostras em placas de 1 mm de espessura por electro erosão por fio, sendo de seguida maquinada até à geometria final pela Roland MDX-650.

Os provetes da liga AISi10Mg obtidos por SLM foram construídos camada a camada, horizontalmente (Plano AB), com as dimensões e forma final, sendo posteriormente separadas da plataforma de construção por electro erosão por fio.



Figura 34- Máquina de DMA Triton Tritec 200.

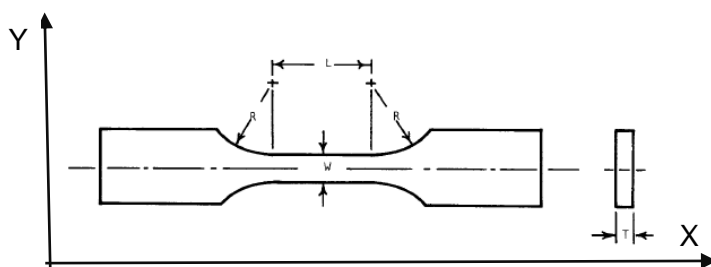
Os provetes finais foram sujeitos aos ensaios DMA apresentados na Tabela 15.

Tabela 15- Ensaios DMA a realizar

|                         |           | Temperatura [C] | Objetivo  |
|-------------------------|-----------|-----------------|---|
| <b>Molde permanente</b> | Provete 1 | 25              | Obtenção de propriedades à temperatura ambiente.                              |
|                         | Provete 2 | 25-150          | Evolução das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura de trabalho. |
| <b>SLM</b>              | Provete 1 | 25              | Obtenção de propriedades à temperatura ambiente.                              |
|                         | Provete 2 | 25-150          | Evolução das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura de trabalho. |

### 4.3.5. Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga realizaram-se com provetes de dimensões e geometria segundo a norma para ensaios de fadiga à tração ASTM E466-01 (Figura 35).



|   | [mm] |
|---|------|
| <b>Comprimento do provete</b>                     | 80   |
| <b>Largura de Aperto</b>                          | 15   |
| <b>R- Raio Tangencial (8*W)</b>                   | 80   |
| <b>W- Largura da secção de ensaio (2 a 6 * T)</b> | 10   |
| <b>T- Espessura</b>                               | 4    |
| <b>L-Comprimento da seção de ensaio</b>           | 25   |
| <b>Kt-Fator de concentrações de tensões</b>       | 1    |

Figura 35- Dimensões e geometria do provete do ensaio de fadiga.

Para a obtenção desta geometria nas amostras de AlSi10Mg obtida em molde permanente, procedeu-se ao corte das amostras em placas de 4.1 mm de espessura por electro erosão por fio, sendo de seguida maquinada a geometria final, segundo o plano XY pela Roland MDX-650.

Os provetes produzidos na liga AlSi10Mg por SLM foram construídos camada a camada, segundo o plano XY, com as dimensões e forma final. Posteriormente separados da plataforma de construção por electro erosão por fio.

Seguindo-se os procedimentos da norma ASTM E466-1, os provetes foram lixados com lixa de granulometrias de 320, 500, 800, 1000 e 1200, no sentido longitudinal (eixo de aplicação da força).

Após o polimento, mediu-se a rugosidade dos provetes para garantir que o seu acabamento estava de acordo com o pretendido. Os valores de rugosidade média ( $R_a$ ), média das alturas entre picos e vales ( $R_z$ ), altura máxima entre picos ( $R_{máx}$ ) e rugosidade estatística ( $R_k$ ) são apresentados na Tabela 16. Os valores apresentados resultaram de várias medições efetuadas aos 4 provetes de fadiga, após o seu polimento, através do rugosímetro Mahr Perthometer M2.

Tabela 16- Rugosidade dos provetes para ensaio de fadiga.

| <b>Ra</b> | <b>Rz</b> | <b>R máx.</b> | <b>Rk</b> |
|-----------|-----------|---------------|-----------|
| 0,22±0,09 | 1,225±0,5 | 1,9±0,8       | 0,55±0,3  |

Devido às limitações do número de provetes para caracterização do material à fadiga, decidiu-se caracterizar as duas ligas em apenas um ponto. Este ponto tem em consideração a tensão limite de elasticidade das duas ligas. A tensão máxima aplicada durante o ensaio de fadiga para as duas ligas situa-se em 80% da sua tensão limite de elasticidade. Assim será possível comparar o comportamento das duas ligas para os mesmos níveis de solicitações (%) no regime elástico.

De acordo com norma ASTM E466-1 procedeu-se à realização dos ensaios dos 4 provetes de fadiga na máquina de ensaio Instron 8802 de 150 kN. Utilizou-se para o ensaio uma relação de tensão (R) máxima e mínima de -1 e uma frequência de ensaio de 18 Hz.



Figura 36- Equipamento de ensaio de fadiga Instron 8802.

## 4.4. Resultados Experimentais

### 4.4.1. Análise Microscópica

---

Os resultados da análise microscópica são apresentados na Figura 37, onde se observa a microestrutura da liga obtida por fundição em molde permanente, por SLM no plano longitudinal e transversal ao varrimento, com uma ampliação de 20, 50 e 100 vezes.

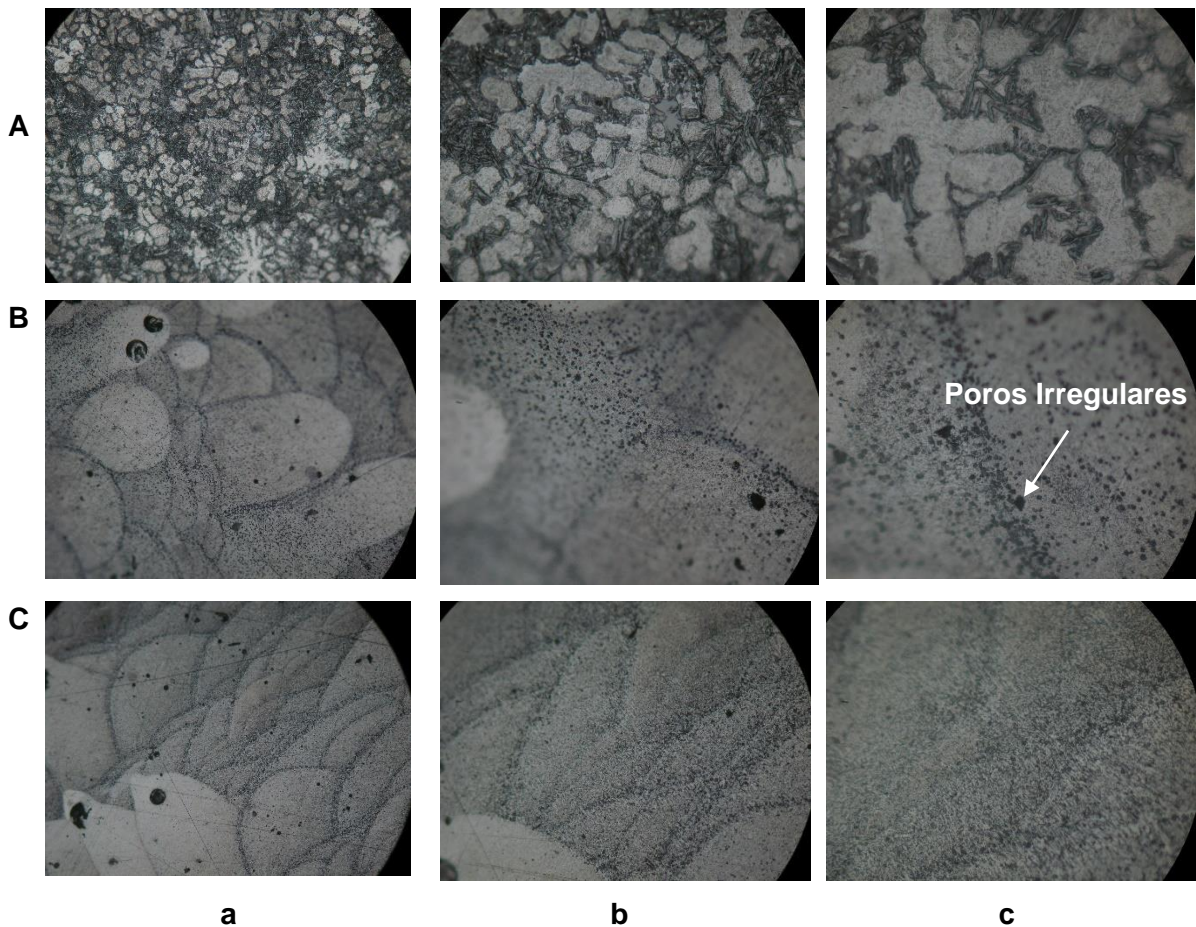


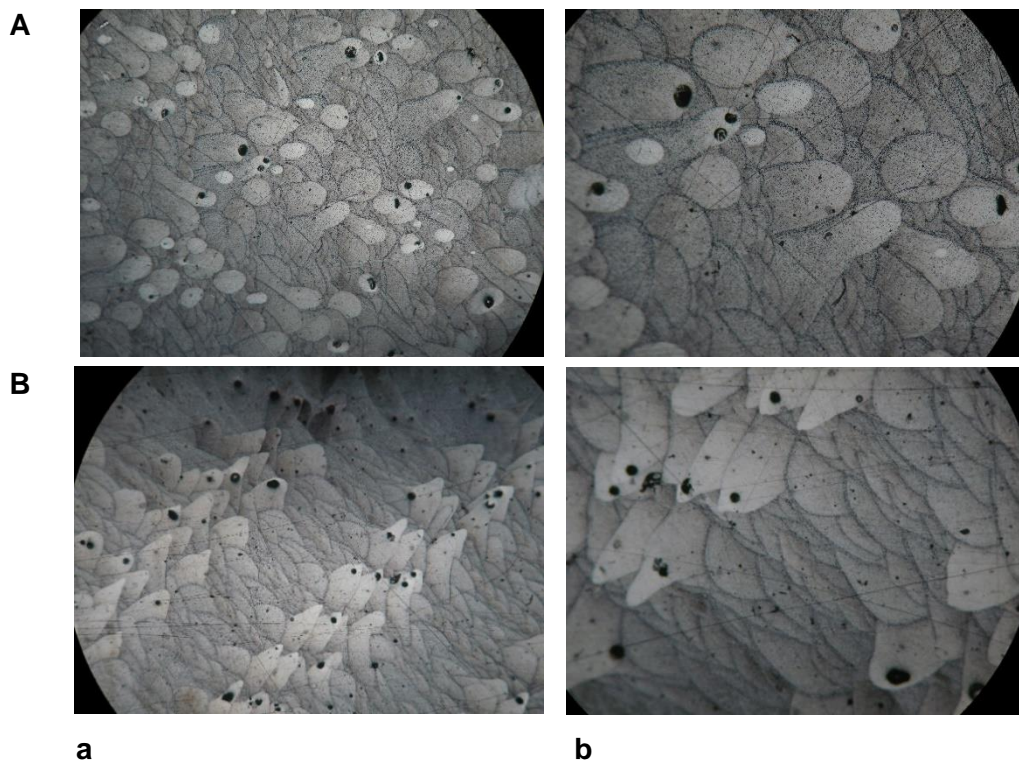
Figura 37- Microestrutura das ligas estudadas. A- Liga AlSi10Mg fundida em molde permanente, a-20x, b-50x; c-100x; B- Liga AlSi10Mg fundida por laser (plano de varrimento); C- Liga AlSi10Mg fundida por laser (plano perpendicular ao varrimento), a-20x, b-50x; c-100x.

A Figura 37A, como esperado, apresenta os grãos de fase sólida de alumínio bem definidos e contornados pela fase eutética de silício na liga obtida por fundição em molde permanente.

Por outro lado, na liga obtida por SLM, com a ampliação disponível não é possível observar os limites de grãos de alumínio, indo ao encontro da bibliografia consultada que afirma que

a estrutura das ligas obtidas por SLM são muito mais finas que as obtidas por fundição convencional. É também possível observar os limites das poças de fusão na microestrutura da liga obtida por SLM que, segundo estudos efetuados anteriormente, se deve ao facto de nas fronteiras das poças de fusão a liga apresentar grãos ligeiramente mais grosseiros, que correspondem à zona afetada pelo calor [25] [30].

Tal como nos estudos [25] e [30] referidos anteriormente, também é possível observar a presença de poros irregulares e esféricos nas metalografias obtidas para a liga obtida por SLM no nosso estudo. Os poros irregulares estão localizados nas fronteiras dos poços de fusão, os quais são provocados pela não fundição de pó ou por uma sobreposição insuficiente entre as passagens no laser. Os poros esféricos são normalmente provocados pela presença de gases resultantes da evaporação do óxido ou do pó [25].



*Figura 38- Microestrutura da liga AlSi10Mg obtida por SLM; A- Plano de varrimento: a-5x, b-10x; B- Plano perpendicular ao varrimento:a-5x, b-10x.*

A estratégia de varrimento usada no processamento do material afeta a microestrutura das ligas obtidas. Na Figura 38A é perfeitamente visível uma refusão das poças de fusão no plano de passagem do laser, devido às passagens perpendiculares entre camadas, o que resulta da rotação de 90° das ilhas de varrimento. Já no plano transversal (Figura 38B) é possível observar a refusão provocada pela poça de fusão na camada anterior. A análise destas microestruturas permitiu concluir que os componentes obtidos por SLM não são isotrópicos.

Esta visualização tão clara da estratégia de varrimento através de uma análise microscópica foi igualmente observada pelo estudo a que reporta a referência [38].

## 4.4.2. Dureza

---

A Tabela 17 apresenta os valores das várias medições de durezas efetuadas nas duas ligas. Uma vez que se observou na análise microscópica existirem diferenças na microestrutura nos dois planos da liga obtida por SLM, foram também realizadas medições de dureza nos dois planos para verificar se existia uma variação de dureza significativa.

Tabela 17- Microdureza Vickers da liga AlSi10Mg (Força= 4.903N, t=10 segundos).

| Medição      | AlSi10Mg obtido em molde permanente | AlSi10Mg SLM Plano Longitudinal | AlSi10Mg SLM Plano Transversal |
|--------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1            | 74.1                                | 127                             | 140                            |
| 2            | 75.6                                | 138                             | 134                            |
| 3            | 84.7                                | 129                             | 128                            |
| 4            | 81.3                                | 142                             | 133                            |
| 5            | 79.3                                | 128                             | 146                            |
| 6            | 75.9                                | 145                             | 128                            |
| 7            | 78                                  | 131                             | 139                            |
| 8            | 80.5                                | 138                             | 138                            |
| <b>Média</b> | 78.68                               | 134,75                          | 135,75                         |

É possível observar nos resultados obtidos que na liga obtida por fundição em molde permanente a dureza apresenta valores de aproximadamente 35 HV mais baixos que na liga obtida por SLM. É também possível verificar que não existe uma diferença significativa entre a dureza no plano longitudinal e transversal da liga obtida por SLM, tal como se pode observar no gráfico da Figura 39.

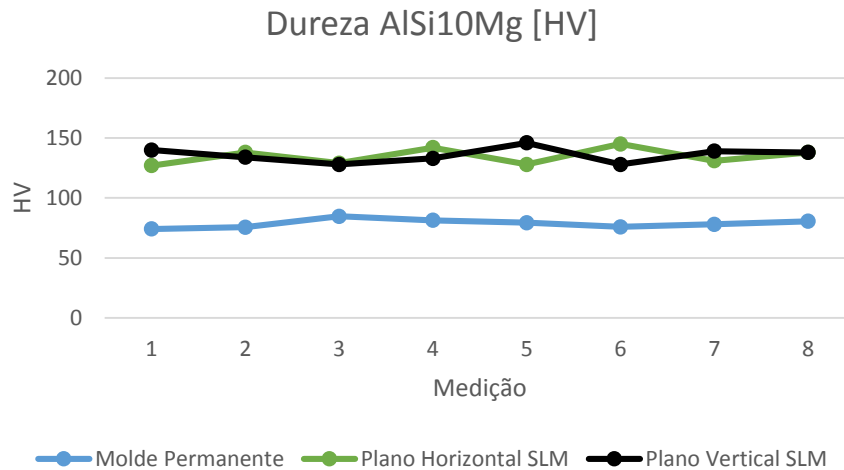


Figura 39- Evolução das medições de dureza efetuadas às duas ligas AlSi10Mg

Os valores obtidos estão de acordo com a bibliografia disponível, como pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 18- Valores de Microdureza de Vickers de referência para a Liga AlSi10Mg.

| Liga                     | Fabricante    | Tratamento Térmico | HV       | Referência   |
|--------------------------|---------------|--------------------|----------|--------------|
| Fundição Convencional    | -             | Envelhecida        | 86       | [39]         |
| Fundição em alta pressão | -             | Não                | 95-105   | [39]         |
| SLM                      | Concept Laser | Não                | 135±3.04 | [38]         |
| Fundição Convencional    | FUNDIVEN SA   | Não                | ~78      | Nosso Estudo |
| SLM                      | Concept Laser | Não                | ~134     | Nosso Estudo |

Observando os valores de dureza nas referências bibliográfica constata-se que os valores de dureza do nosso estudo para a liga AlSi10Mg obtida por SLM são bastante similares. Por outro lado, a dureza obtida para liga por fundição convencional e envelhecida apresenta valores ligeiramente superiores. Este endurecimento deve-se ao facto de as ligas obtidas por fundição, durante o tratamento de envelhecimento, formarem precipitados de  $Mg_2Si$ . Estes precipitados contribuem para o endurecimento da matriz, sem comprometer de forma relevante as restantes propriedades mecânicas [38]. No caso da liga obtida por SLM, a elevada dureza é provocada pela dispersão fina de Si na fase de Al, tendo pouca influência o tratamento de envelhecimento na dureza dos componentes [38].

Tal como esperado, as ligas obtidas por SLM apresentam uma dureza mais elevada do que as ligas obtidas por fundição. Isto acontece devido ao facto de os componentes obtidos por SLM possuírem uma estrutura de solidificação detritica bastante fina devido aos elevados gradientes térmicos verificados durante o processo de fabrico, que originam excelentes propriedades mecânicas nas ligas [39].

### 4.4.3. Ensaio de tração

---

Os resultados obtidos no ensaio de tração apresentam-se na Tabela 19. Através deste ensaio determinaram-se os valores de tensão de rotura, tensão de cedência com *offset* de 0.2% e a deformação registada no momento rotura em percentagem. O módulo de elasticidade não foi possível obter neste ensaio, uma vez que a máquina de ensaio não possui uma célula de carga com resolução suficiente que permita o registo adequado das pequenas deformações ocorridas no regime elástico do material.

Tabela 19- Resultados do ensaio de tração.

|  | AlSi10Mg obtida em molde permanente. |           | AlSi10Mg por SLM |           |
|--|--------------------------------------|-----------|------------------|-----------|
|  | Provete 1                            | Provete 2 | Provete 1        | Provete 2 |
| <b>Tensão de Rotura [MPa]</b>                                | 192,89                               | 192,15    | 314,67           | 295,83    |
| <b>Tensão Limite de elasticidade proporcional 0.2% [Mpa]</b> | 100                                  | 100       | 180              | 190       |
| <b>Deformação até à rotura [%]</b>                           | 3.8                                  | 3         | 4.2              | 3.5       |

Tal como esperado a tensão limite de elasticidade convencional e a tensão de rotura da liga obtida por SLM são bastantes superiores, comparativamente com a liga de fundição em molde permanente. Este comportamento é justificado, como referido anteriormente, pelas elevadas taxas de arrefecimento verificadas no SLM, que proporcionam a formação de grãos refinados, aumentando a área de contacto da matriz de alumínio e os seus precipitados, dificultando assim o seu movimento, melhorando desse modo a resistência mecânica. Quanto ao alongamento na rotura, verificam-se valores bastantes semelhantes nas duas ligas.

De modo a validar os ensaios realizados, foram consultadas várias referências bibliográficas, uma vez que os provetes disponíveis são em número reduzidos. A Tabela 20 apresenta os valores de referência consultados.

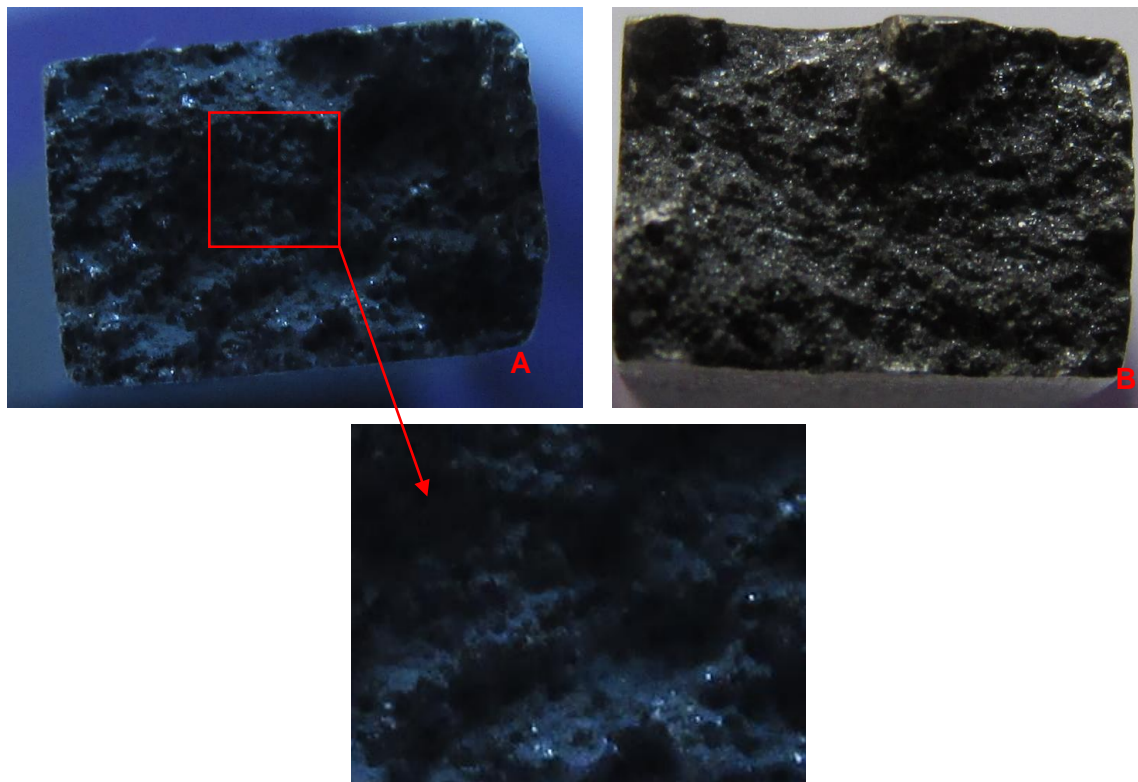
Tabela 20- Valores de referência das propriedades mecânicas da liga AlSi10Mg obtida por fundição e SLM.

| Obtenção da liga AlSi10Mg              | Fabricante/Máquina   | Tratamento       | $\sigma_{Rotura}$ [Mpa] | $\sigma_c$ [Mpa] | E [GPa]    | $\epsilon_{Rotura}$ [%] | Referência |
|--|--|------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------------|------------|
| Fundição Convencional                  | -  | Envelhecida      | 300-317                 | -                | 71         | 2.5-3.5                 | [39]       |
| AC EN AlSi10Mg (a) em molde permanente | -  | Não              | 180                     | 90               | -          | 2.5 (mínima)            | [40]       |
| SLM                                    | Concept Laser M1 (Laser 200W, foco 150 $\mu$ m, horizontal, 1400mm/s, Bidirecional e espaçamento de 105 $\mu$ m, densidade de 98,5%) | Não              | 391 $\pm$ 6             | -                | 68 $\pm$ 3 | 5.55 $\pm$ 0.6          | [39]       |
| SLM                                    | Concept Laser (Laser 200W, horizontal, bidirecional, rotação 90°, 1400 mm/s, densidade 98.84 $\pm$ 0.34)                             | Não              | 407 $\pm$ 22            | 308 $\pm$ 20     | 71 $\pm$ 7 | 4.37 $\pm$ 1.5          | [38]       |
| SLM                                    | Concept Laser (Laser 200W, horizontal, bidirecional, rotação 90°, 1400 mm/s, densidade 98.84 $\pm$ 0.34)                             | Sim (1h a 175°C) | 440 $\pm$ 49            | 308 $\pm$ 20     | 71 $\pm$ 7 | 4.37 $\pm$ 1.46         | [38]       |

Para a liga obtida por fundição em molde permanente, os valores de tensão de rotura, tensão de cedência e deformação no momento da rotura do nosso estudo estão bastante próximos dos valores de referência para a liga sem tratamento térmico. Sendo que os valores de referência para a mesma liga com envelhecimento são bastante superiores aos obtidos por nós, como seria de esperar, devido ao endurecimento da liga pela formação de precipitados.

Por outro lado, na liga obtida por SLM, os valores de tensão de cedência e tensão de rotura resultantes do nosso estudo são consideravelmente mais baixos que os valores de

referência. A deformação no momento da rotura também é ligeiramente menor no nosso estudo, o que pode ser justificado pela presença de um número anormal de poros nos nossos provetes, que pode ter levado à rotura prematura dos mesmos. A Figura 40 apresenta a superfície de fratura das duas ligas. A superfície da fratura da liga obtida por SLM apresenta um aspeto muito mais grosseira do que a fratura da liga obtida por fundição.



*Figura 40- Superfície de fratura de provetes de tração, A- AISi10Mg obtida por SLM; B- AISi10Mg obtido em molde permanente.*

A ampliação da superfície da fratura da liga fabricada por SLM permite observar diversos poros na zona de fratura. Pode daí presumir-se que a liga possuía um grau de porosidade superior aos estudos consultados. Este facto pode ser justificado pela utilização de um laser de maior potência no processamento dos nossos provetes, pois mantendo os parâmetros de velocidade e aumentando a potência do laser, a evaporação pode aumentar, produzindo por isso mais poros nos provetes construídos [38].

#### 4.4.4. Ensaio DMA

O gráfico da Figura 41 apresenta o registo do ensaio de DMA à temperatura ambiente da liga AlSi10Mg, obtida por SLM e por fundição em molde permanente. Neste é possível observar os valores do módulo de elasticidade dinâmico e do amortecimento.

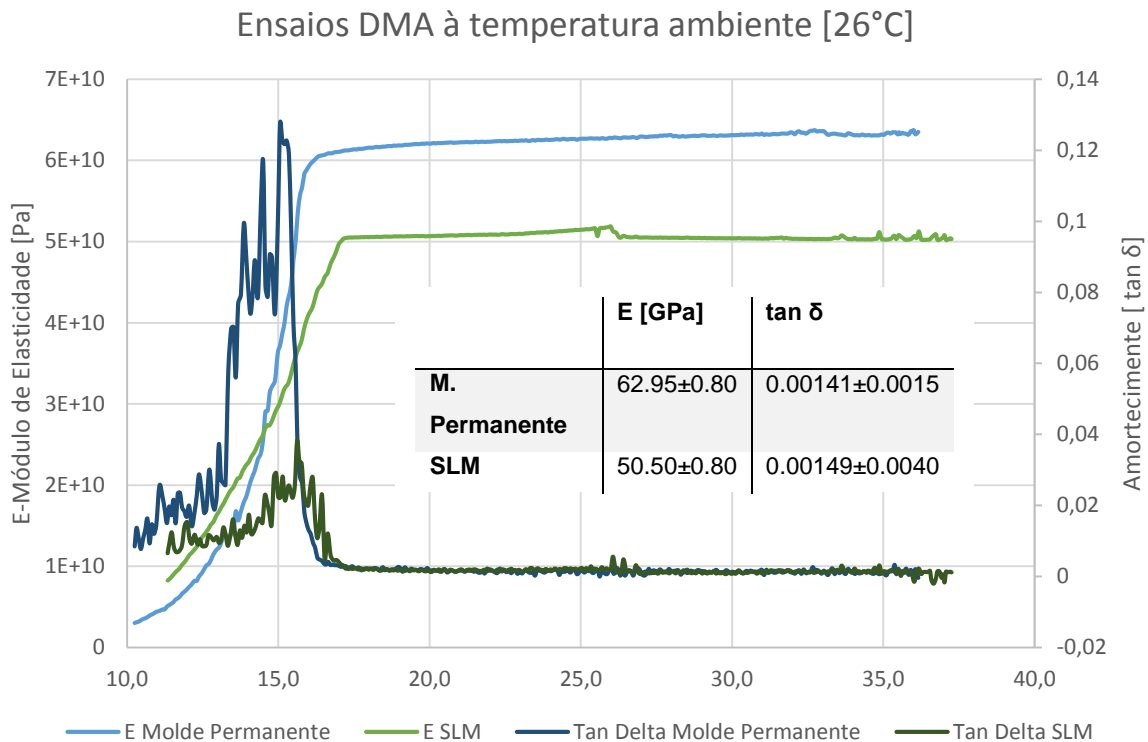


Figura 41- Resultados do ensaio de DMA para a temperatura ambiente da liga AlSi10Mg obtida em molde permanente e SLM.

O módulo de elasticidade dinâmico da liga obtida em molde permanente é mais elevado que na fabricada por SLM. Quanto ao amortecimento, as ligas apresentam um comportamento bastante semelhante.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos são menores que os valores de referência, no entanto é necessário considerar que o módulo de elasticidade calculado no nosso estudo é dinâmico, sendo obtido com uma sucessão de aplicações de cargas cíclicas, podendo o fator de recuperação do material influenciar o resultado obtido.

No gráfico da Figura 42 é possível observar a evolução do módulo e do amortecimento com o aumento de temperatura.

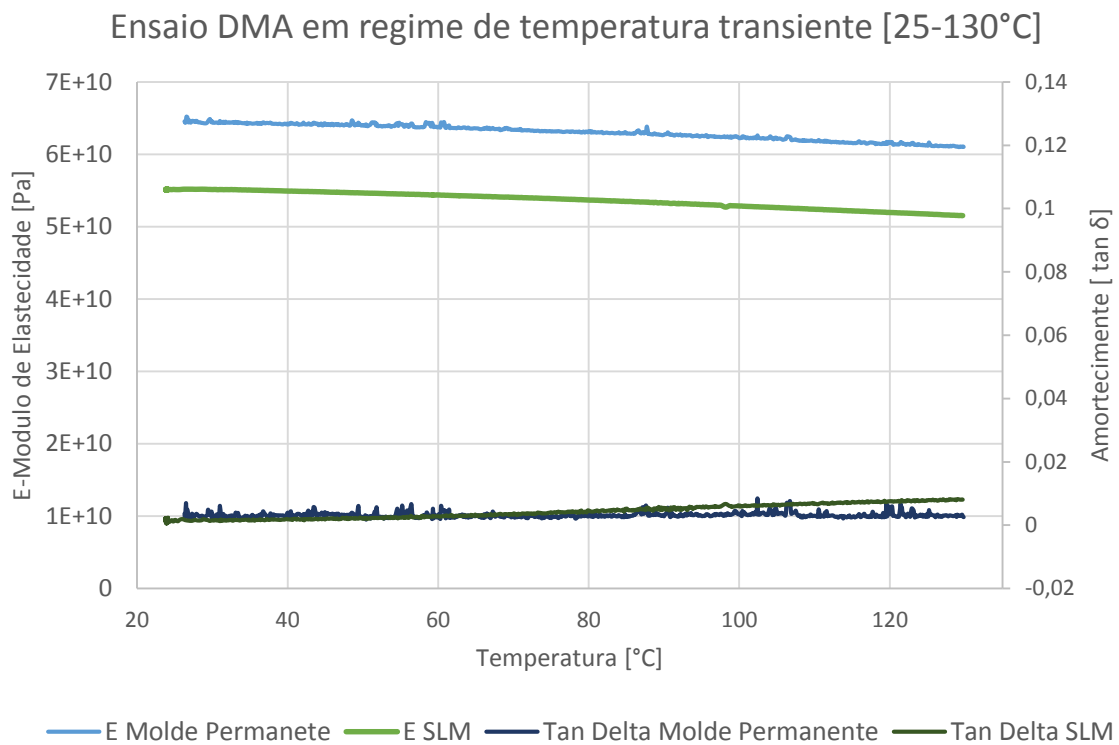


Figura 42- Resultados do ensaio de DMA em temperatura transiente da liga AISi10Mg obtida em molde permanente e SLM.

Assim como esperado, o módulo de elasticidade das duas ligas diminui ligeiramente com o aumento de temperatura. Tendo em conta a evolução do módulo nas duas ligas é possível observar que o comportamento entre elas é bastante semelhante, sendo o declive das duas curvas praticamente igual.

Relativamente ao amortecimento, na liga obtida em molde permanente este permanece inalterado com aumento de temperatura. Contrariamente, a capacidade de amortecimento por parte da liga obtida por SLM tende a aumentar com a temperatura. Sendo esta capacidade de amortecimento dada pela razão entre o módulo de absorção e o módulo de perda, podemos admitir que o módulo de perda da liga obtida por SLM tem perdas superiores ao módulo de absorção com o aumento de temperatura.

#### 4.4.5. Ensaio de Fadiga

---

Os resultados dos ensaios de fadiga realizados encontram-se apresentados na Tabela 21, onde é possível visualizar o número de ciclos até à rutura dos provetes quando aplicada uma carga cíclica correspondente a 80% da tensão limite de elasticidade em cada uma das ligas.

Tabela 21- Resultados dos ensaios de fadiga realizados.

|   | AlSi10Mg obtida em molde permanente. |           | AlSi10Mg por SLM |           |
|---|--------------------------------------|-----------|------------------|-----------|
|   | Provete 1                            | Provete 2 | Provete 1        | Provete 2 |
| <b>Tensão 80% da tensão de limite de elasticidade [MPa]</b> | 80                                   | 80        | 148              | 148       |
| <b>Número de ciclos até à rutura</b>                        | 568000                               | 216000    | 19216            | 16450     |

O número de ciclos até à rutura da liga obtida por fundição em molde permanente é bastante superior à liga resultante do SLM quando aplicada a mesma carga relativamente à tensão limite de elasticidade (80%).

Para a liga obtida em molde permanente o número de ciclos até à fratura no provete 1 é significativamente superior ao obtido no provete 2. Mesmo sendo normal a variação do número de ciclos obtidos em dois provetes nas mesmas condições de teste, não é previsível uma variação tão significativa, sendo previsível por isso uma rutura prematura do provete 2.

Para poder de alguma maneira validar estes resultados, foram consultadas curvas S-N da liga AlSi10Mg obtida em molde permanente e por SLM, resultantes de estudos anteriores e expressos na bibliografia. A Figura 43 apresenta a curva S-N da liga obtida em molde permanente e tratada termicamente para diferentes graus de porosidades.

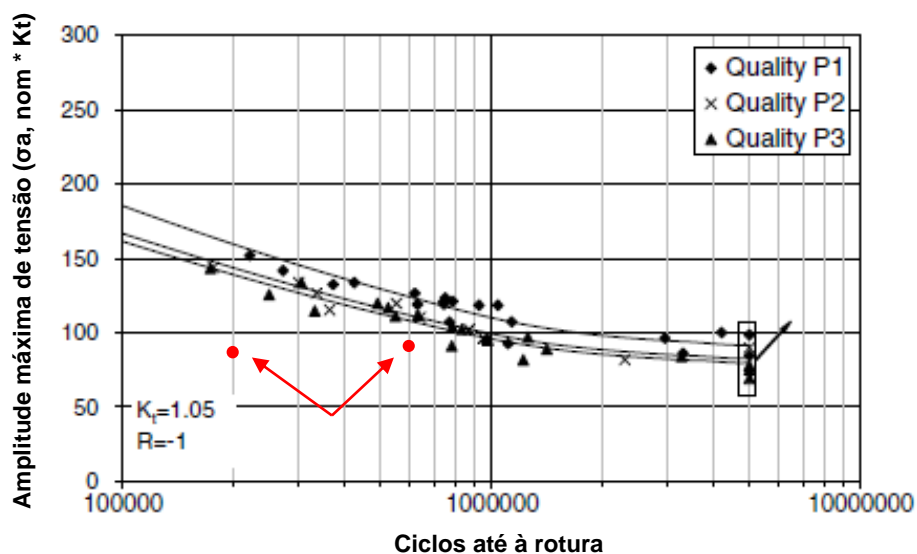


Figura 43- Curva de ensaios de fadiga à liga AISi10Mg obtida em molde permanente- com tratamento térmico. Amplitude máxima de tensão ( $\sigma_a, \text{nom} * K_t$ ) por Numero de ciclos rotura até à rotura  $K_t = 1.05$  [41].

De acordo com o estudo [41] a resistência (vida) à fadiga de componentes da liga AISi10Mg obtida em molde permanente é influenciada pelo nível de porosidade. Os provetes P1, que apresentam menor porosidade, têm melhor comportamento à fadiga do que os provetes de qualidade P3, de maior porosidade. Como se pode verificar pela Figura 43 a tensão (produto tensão nominal aplicada ( $\sigma_{a,\text{nom}}$ ) pelo fator de concentração de tensões ( $K_t$ )) limite de fadiga desta liga variou entre aproximadamente 75-95 Mpa, de acordo com o nível de porosidade da liga, para um número de ciclos considerado de  $5 \cdot 10^6$ .

Os pontos obtidos no nosso estudo para a liga obtida em molde permanente estão apresentados a vermelho na Figura 43. Como referido anteriormente, o resultado obtido no ensaio provete 2 encontra-se completamente fora do esperado, já no provete 1 o ponto obtido encontra-se abaixo das curvas obtidas pelo estudo citado. No entanto, este facto é perfeitamente aceitável, uma vez que a nossa liga não possui qualquer tratamento térmico.

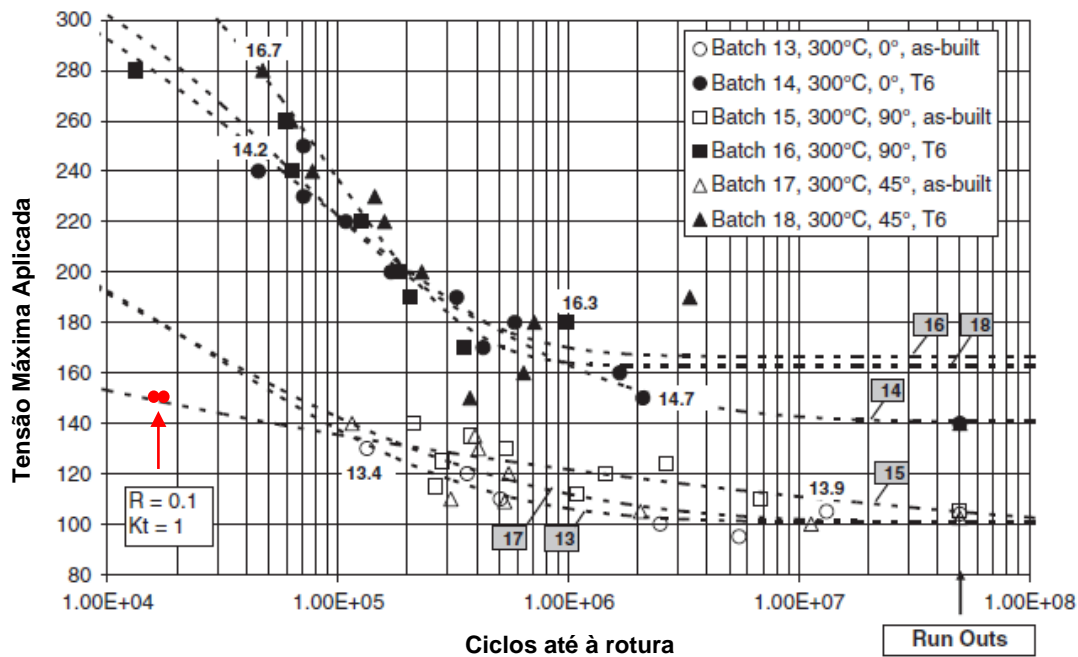


Figura 44- Resistência à fadiga e distribuição de Weibull da liga AlSi10Mg obtida por SLM construídos com uma plataforma a 300 °C [28].

Na Figura 44 é possível observar os resultados dos ensaios de fadiga de uma liga AlSi10Mg obtida por SLM, com uma plataforma aquecida a 300°C efetuado pela referência [28]. É possível observar que existe uma variação significativa na tensão limite de fadiga entre a liga com e sem tratamento térmico, tendo as ligas tratadas termicamente um melhor comportamento à fadiga. Relativamente à orientação de construção dos provetes, os maiores valores de tensão limite de fadiga são obtidos nos provetes construídos verticalmente. Os valores de tensão limite de fadiga para a liga sem tratamento térmico são bastante próximos de 100 MPa, variando entre 140 e 170 MPa na liga tratada termicamente em função da orientação de construção.

Os pontos vermelhos representados na Figura 44, identificam os resultados obtidos nos dois provetes obtidos por SLM testados no nosso estudo. Observando a curva de Weibull correspondente ao lote de provetes 13 do estudo [28], liga obtida na mesma orientação dos nossos provetes e sem tratamento térmico, é possível verificar que os nossos pontos se situam abaixo desta linha. Isto pode ser explicado pelo facto de no caso do estudo consultado os provetes serem obtidos com aquecimento da plataforma de construção, o que provoca uma diminuição das tensões residuais no provete, tornando-o assim menos frágil. Também é preciso ter em consideração que a relação de tensão utilizada no estudo consultado é de 0.1, ou seja a tensão média do ensaio é diferente de zero, o que provoca

um deslocamento positivo das curvas tensão máxima aplicada – número de ciclos no eixo das coordenadas relativamente ao ensaio com uma relação de tensão de -1 [33].

Comparando-se as duas ligas em estudo, é possível observar que a tensão limite de fadiga nas ligas obtidas em molde permanente com tratamento térmico é equivalente às ligas obtidas por SLM sem tratamento térmico, sendo que tratando termicamente as ligas obtidas por SLM estas conseguem ter um comportamento superior às ligas obtidas em molde permanente.

No entanto, segundo os resultados obtidos no nosso estudo é possível observar que o número de ciclos para a mesma porção da tensão limite de elasticidade das duas ligas é bastante superior na liga obtida em molde permanente.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 5. Conclusões

---

Na tentativa de cumprir as normas ambientais impostas aos construtores automóveis, os metais de baixa densidade têm sido inseridos na construção de veículos em detrimento de metais mais pesados, reduzindo assim o seu peso e conseqüentemente o consumo de combustível.

A utilização da tecnologia SLM no fabrico de componentes para o sector automóvel em AlSi10Mg pode conduzir à eliminação das limitações existentes nos processos convencionais de fabrico do alumínio.

No entanto, para que seja possível uma correta aplicação desta tecnologia no alumínio é fundamental existir um domínio total dos parâmetros que influenciam o seu processamento, dado ser necessário assegurar o fabrico de peças com o mínimo de porosidade. Para que seja possível, é importante conseguir eliminar os 4 principais problemas do processamento de ligas de alumínio, que são respetivamente, a elevada refletividade, a condutividade térmica, a atmosfera reativa e a sua oxidação. Para tal, procede-se à utilização de lasers de grande potência que garantem densidade energética suficiente para fundir os pó de alumínio e simultaneamente evaporar os óxidos e envolvê-los por alumínio fundido nas poças de fusão. Para reduzir as elevadas taxas de arrefecimento, por vezes torna-se necessário o aquecimento da plataforma de construção, de modo a diminuir os gradientes de temperatura e conseqüentemente reduzir as tensões residuais e distorções. A atmosfera reativa é eliminada com a utilização de atmosferas controladas de Azoto, Árgon ou Hélio.

Relativamente às propriedades da liga AlSi10Mg obtida por SLM, esta apresenta uma microestrutura bastante refinada comparativamente à liga obtida em molde permanente, resultante das elevadas taxas de arrefecimento do processo, contudo a microestrutura não é totalmente uniforme, uma vez que é possível observar uma microestrutura mais grosseira nos limites das poças de fusão provocado pelo facto de as zonas vizinhas se encontrarem afetadas pelo calor. Esta estrutura mais grosseira que envolve as poças de fusão solidificadas permite observar a estratégia de varrimento utilizada, através do estudo da refusão das poças. Uma vez que esta refusão apresenta diferenças no plano de passagem do laser e o plano perpendicular, é possível concluir que as propriedades da liga AlSi10Mg obtida por esta tecnologia não são isotrópicas.

No que respeita as propriedades mecânicas, a liga obtida por SLM apresenta uma dureza significativamente superior à liga de fundição em molde permanente, o que deriva do facto dos componentes obtidos por SLM possuírem uma estrutura de solidificação bastante mais fina.

Nos ensaios de tração verificou-se, como seria espectável, que os valores de tensão de cedência e rotura da liga obtida por SLM são também eles consideravelmente superiores ao da liga obtida em molde permanente, sendo este facto justificado, mais uma vez pela microestrutura da matriz de alumínio bastante mais fina da liga fabricada por SLM, o que permite uma maior área de contacto dos grãos de alumínio com os precipitados, dificultando, deste modo, o seu movimento quando solicitados por uma carga exterior.

Por sua vez, o módulo de elasticidade obtido no ensaio DMA é superior na liga obtida em molde permanente, o que permite afirmar que a liga obtida em molde permanente sofre menos deformações no regime elástico para o mesmo nível de solicitações. No entanto, verificou-se que as perdas de propriedades mecânicas (módulo de elasticidade) com o aumento de temperatura são bastante semelhantes nas duas ligas, assim como a capacidade de amortecimento.

No comportamento à fadiga, segundo estudos realizados anteriormente, a liga obtida em SLM apresenta uma tensão limite fadiga mais elevada. No entanto para os pontos da curva S-N obtidos no nosso estudo, com uma carga de 80% da tensão limite de elasticidade a liga obtida em molde permanente apresenta um maior número de ciclos até rotura.

É ainda relevante destacar, que os valores das propriedades mecânicas obtidas neste projeto, são relativamente mais baixas que as referências bibliográficas consultadas, visto as nossas ligas AlSi10Mg possuírem qualquer tratamento térmico e as amostras obtidas por SLM não terem sido sujeitas a nenhum aquecimento durante o seu processamento.

Em suma, conclui-se que é possível a utilização da tecnologia SLM na produção de componentes automóveis na liga AlSi10Mg em detrimento dos processos de fabrico convencionais, uma vez que esta nos permite obter propriedades equivalentes ou superiores às ligas convencionais.

## 5.1. Trabalhos Futuros

---

Os resultados práticos obtidos neste projeto revelaram algumas limitações, devido ao número reduzido de provetes disponíveis, principalmente para a realização dos ensaios de fadiga. Deste modo seria interessante em trabalhos futuros obter as curvas S-N das duas ligas estudadas, assim como, efetuar o estudo com provetes obtidos em diferentes planos de construção, tendo que para esse efeito, dispor-se de mais amostras.

As ligas AlSi10Mg foram testadas, tal como construídas, sem nenhum tratamento térmico, podendo ser conveniente analisar a evolução das propriedades mecânicas destas ligas com diferentes tratamentos térmicos. Depois de devidamente caracterizadas, estudos semelhantes podem ser efetuados a outras ligas de alumínio utilizadas em componentes automóveis.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Bibliografia

---

- [1] Regulamento (CE) n 715/2007, “Regulamento (CE) n. o 715/2007 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de Junho de 2007 , relativo à homologação dos veículos a motor no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 5 e Euro 6),” 20 Junho 2007.
- [2] European Aluminium Association(2013), “Aluminium in Cars – Unlocking the light-weighting potential”.*edition 2013*.
- [3] B. Cantor, P. Grant e C. Johnsonston, Automotive Engineering : Lightweight Functional and novel materials, New York : Taylor and Francis Group.
- [4] F. Ostermann, Aluminium Materials Technology for Automobile Construction., German: Expert Verlag, 1992.
- [5] European Aluminium Association , “TALAT Lecture 1501-Aluminium : Physical Properties, Characteristics and Alloys,” 1994.
- [6] ASM International , Metals Handbook, Desk Edition , 2001.
- [7] Associação Brasileira do Alumínio , “Fundamentos e Aplicações do Alumínio,” Maio 2007.
- [8] E. Filho, Seleção de Metais Não Ferrosos, UNICAMP, 1992, pp. 25-43.
- [9] R.A.Oliveira, “O Forjamento de Ligas de Alumínio – Um estudo para a Liga ABNT 6061,” Porto Alegre, 2001.
- [10] N. R. Oliveira, “Transformações microestruturais nas ligas de alumínio arrefecidas desde o domínio semi-sólido,” Aveiro, 2008.
- [11] W. Smith, Principios de ciência e Engenharia dos Materiais, Terceira ed., pp. pag-525-545.

- [12] C. A. M. Relvas, “Tecnologias de prototipagem rápida aplicada a componentes geométricamente complexas,” Porto, 2002.
- [13] N. Guo e M. C. Leu, “Additive manufacturing: technology, applications and research needs,” 13 Dezembro 2013.
- [14] L.S.Bertol, “Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção no design de implantes personalizados,” 2008.
- [15] J. A. S. Junior, “Análise comparativa entre os processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos: um estudo de caso para determinação do processo mais indicado,” Curitiba, 2008.
- [16] J. d. S. Azeredo, G. G. d. P. Junior, R. d. B. O. d. Santos, D. N. S. Barreto e T. J. M. Gonçalves, “Utilização do método de análise hierárquica (AHP) para seleção de um sistema integrado de gestão (ERP),” em *XXIX Encontro Nacional de Engenharia e Produção*, Salvador, 2009.
- [17] F. W. Liou, *Rapid Prototyping and Engineering Applications - A Toolbox for prototype development*, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2008, pp. 271-275.
- [18] S. Bremen, W. Meiners e A. Diatlov, “Selective Laser Melting-A manufacturing technology for the future?,” WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.
- [19] L. Esperto e A. Osorio, “Sinterização directa por laser de metais,” INETI, DMTP/UTP, Edifício, 1649-038 Lisboa, 2008.
- [20] “SLM Solutions GmbH,” [Online]. Available: <http://stage.slm-solutions.com/download.php?f=8277396e9b97045edbb7ef680e3ada56>. [Acedido em 03 Julho 2014].
- [21] “EOS-Systems and Equipment,” [Online]. Available: <http://www.eos.info/04ea46b9719f528e/systems-and-equipment>. [Acedido em 02 Julho 2014].
- [22] “Brochure-MCP Realizer,” [Online]. Available: [http://www.realizer.com/wp-content/themes/realizer/Brochure\\_EN.pdf](http://www.realizer.com/wp-content/themes/realizer/Brochure_EN.pdf). [Acedido em 02 Julho 2014].

- [23] E. Louvis, P. Fox e C. J. Sutcliffe, "Selective laser melting of aluminium components," *Journal of Materials Processing Technology*, 2011.
- [24] I. Yadroitsev e I. Smurov, "Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders," *ScienceDirect*, 2011.
- [25] L. Thijs, K. Kempen, J.-P. Kruth e J. V. Humbeeck, "Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg," Belgium, 2011.
- [26] S. H. K. Rafi, T. L. Starr e E. Brent, "A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti-6Al-4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting," Junho 2013.
- [27] C. Laser, "Concept Laser - Automotive Brochure," [Online]. Available: [http://www.concept-laser.de/fileadmin/downloads\\_allg/101026\\_automotive\\_DE\\_EN\\_lowres.pdf](http://www.concept-laser.de/fileadmin/downloads_allg/101026_automotive_DE_EN_lowres.pdf). [Acedido em 29 10 2014].
- [28] E. B. Buchbinder, U. Heckenberger, V. Holzinger e Damien, "Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior," *Materials and Design*, 2011.
- [29] X. Wang, L.C.Zhang, M.H.Fang e T.B.Sercombe, "The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al-12Si alloy," *Materials Science & Engineering A*, p. 370-375, 2014.
- [30] T. Lore, K. Kempen, Jean-Pierre e J. V. Humbeek, "Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder," *SciVerse ScienceDirect*, 2012.
- [31] "Mesinc.net," [Online]. Available: <http://mesinc.net/wp-content/uploads/2012/10/Global-Aluminum-Alloy-Conversion-Chart.pdf>. [Acedido em 07 Julho 2014].
- [32] A. Cruz e J. Carreira, *Ensaio Mecânicos*, Instituto de Soldadura e Qualidade, 1992.
- [33] S. A. Souza, *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos - Fundamentos teóricos e práticos*, 5 ed., São Paulo: Edegar Blucher Ltd, 1990.

- [34] PerkinElmer, *Introduction to Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*, 2008.
- [35] C. Branco, A. Fernandes e P. M. T. d. Castro, *Fadiga em Estrutura Soldadas*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [36] R. Brito, S. Queiroga e J. Macedo, “Caracterização microestrutural e microdureza de uma liga de Al-Si processada por fundição sob alta e baixa pressão,” IFAM - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas.
- [37] “iMER,” [Online]. Available: <http://www.imer.ind.br/eletroerosao.htm>. [Acedido em 17 Setembro 2014].
- [38] M. G. Martinez, “PFC: AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting (SLM),” KU LEUVEN- Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- [39] K. Kempen, L.Thijs, J. V. Humbeeckb e J. Krutha, “Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting,” *ScienceDirect*, 2012.
- [40] “SteelNumber,” [Online]. Available: [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_alloy\\_composition\\_eu.php?name\\_id=1227](http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1227). [Acedido em 15 Outubro 2014].
- [41] J. Linder, M. Axelsson e H. Nilsson, “The influence of porosity on the fatigue life for sand and permanent mould cast aluminium,” *International Journal of Fatigue* 28, p. 1752–1758, 2006.

# Anexos

---



## Anexo 1 - Classificação das Ligas de Alumínio para deformação plástica segundo a *Aluminum Association*.

| Série | Constituição            | Ligas Típicas                | Propriedades   | Aplicações  | Tensão Rotura [MPa] |
|-------|-------------------------|------------------------------|--|---|---------------------|
| 1XXX  | Al                      | 1050<br>1100<br>1350         | -Elevada ductilidade quando recozido;<br>-Ideal para deformações a frio;<br>-Excelente resistência à corrosão.   | -Indústria alimentar;<br>-Recipientes para bebidas;<br>- Permutadores de calor.   | 70-175              |
| 2XXX  | Al-Cu-Mg<br>Al-Cu-Mg-Si | 2017<br>2024<br>2117<br>2219 | -Elevada resistência mecânica;<br>-Resistência à corrosão média;<br>-Adequadas para maquinação;  | -Peças maquinadas e forjadas;<br>-Indústria aeronáutica e dos transportes;<br>-Máquinas e equipamentos.                       | 170-520             |
| 3XXX  | Al-Mn-Mg                | 3003<br>3015                 | -Uso Geral;<br>- Resistência à corrosão;<br>-Boa conformabilidade;<br>-Resistência mecânica moderada;  | -Carroçarias e veículos em geral;<br>-Construção Civil.   | 140-280             |
| 4XXX  | Al-Si                   | 4043<br>4047                 | -Ligas utilizadas como material de adição para processos de soldadura;   | -Soldar ligas das séries 1XXX, 3XXX e 6XXX.   | 105-305             |
| 5XXX  | Al-Mg<br>Al-Mg-Mn       | 5005<br>5052<br>5056         | -Elevada resistência à corrosão;<br>-Dúcteis quando recozidas;<br>-Endurecem rapidamente quando são trabalhadas a frio;<br>-Normalmente a sua resistência mecânica aumenta com a quantidade de Magnésio. | -Carroçarias e veículos em geral;<br>-Componentes para construção civil;<br>-Componentes para embarcações;                    | 140-380             |
| 6XXX  | Al-Mg-Si                | 6053<br>6061<br>6063<br>6351 | -Tratáveis termicamente;<br>-Excelente resistência mecânica na tempera do tipo T6 (Solubilização total e envelhecimento artificial);   | -Carroçarias e veículos em geral;<br>-Componentes para construção civil;<br>-Componentes para embarcações;                    | 150-320             |
| 7XXX  | Al-Zn-Mg                | 7075<br>7178                 | -Tratáveis termicamente;<br>-Elevada resistência mecânica;<br>-Boa resistência à corrosão;<br>-Boa conformabilidade.   | -Moldes para injeção de plástico;<br>-Peças sujeitas a elevados esforços na indústria militar, aeronáutica e em equipamentos. | 380-620             |

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Anexo 2 - Ligas de Alumínio Fundido segundo a *Aluminum Association*.

| Série | Elemento de Liga principal               | Ligas Típicas | Características  | Aplicações   |
|-------|--|---------------|--|--|
| 1XX.X | Al com pureza de 99% ou superior.        | 150.0         | -Não tratável termicamente;<br>- Fundição em moldes de areia, permanentes e sob pressão.   | -Equipamentos elétricos;<br>-Indústria química.  |
| 2XX.X | Cobre                                    | 242.0         | -Excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas;<br>-Fácil maquinação;<br>-Fracas resistência à corrosão;<br>-Fundição em moldes de areia e permanentes.     | -Pistões e cabeças de motores para aviação;<br>-Motores diesel e motocicletas.   |
| 3XX.X | Silício com adição de cobre ou Magnésio. | 295.0         | -Fácil maquinação;<br>-Baixa resistência à corrosão;<br>-Fundição em areia.  | -Elementos estruturais;<br>-Cárteres;<br>-Rodas.   |
|       |  | 355.0         | -Fácil maquinação após tratamento térmico;<br>- Resistência mecânica média;<br>-Boa estanquicidade sob pressão;<br>-Fundição em molde de areia e permanente.             | -Peças complexas sob tensão;<br>-Cabeças de motores;<br>-Camisas do motor;<br>-corpo das válvulas.                                     |
|       |  | 356.0         | -Resistência mecânica média;<br>-Excelente fluidez;<br>-Estanquicidade;<br>-Resistência à corrosão;<br>-Fácil Maquinação;<br>-Fundição em molde permanente e de areia.   | -Peças fundidas de secções finas;<br>-Cilindros;<br>-Válvulas;<br>-Cabeças do motor;<br>-Blocos do motor;<br>-Ferramentas pneumáticas. |
|       |  | 357.0         | -Elevadas resistências mecânica;<br>-Excelente Fluidez;<br>-Resistência à corrosão;<br>-Fundição em molde de areia.  | -Peças sob tensão que exigem relação de peso com elevadas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.                          |
|       |  | 360.0         | -Excelente estanquicidade sob pressão;<br>-Resistente à corrosão;<br>-Muita facilidade em ser maquinada;<br>-Fundição sob pressão.                                       | -Peças externas dos motores.   |
|       |  | A380.0        | -Elevada resistência mecânica tanto em locais com temperatura ambiente como temperatura elevada;<br>-Boa estanquicidade;<br>-Fácil maquinação;<br>-Fundição sob pressão. | -Indústria elétrica e automóvel.   |

|               |          |       |  |  |
|---------------|----------|-------|--|--|
| <b>4XX.X</b>  | Silício  | 413.0 | -Excelente estanquicidade sob pressão;<br>-Difícil maquinação;<br>-Fundição sob pressão.   | -Peças externas de motores;<br>-Peças com secções finas que requerem elevada resistência à corrosão. |
| <b>5XX.X</b>  | Magnésio | 520.0 | -Excelentes propriedades mecânicas, inclusive quando sujeitas a impactos;<br>-Boas condições para anodização e polimento;<br>-Baixa fluidez;<br>-Fácil maquinação e boa resistência à corrosão;<br>-Fundição em areia. | -Peças submetidas a elevadas tensões na indústria da aviação, marítima e dos transportes.            |
| <b>7XX.X1</b> | Zinco    | 712.0 | -Boas propriedades mecânicas;<br>-Fácil Maquinação;<br>-Boa Resistência à corrosão;<br>-Fundição em areia.   | -Peças fundidas para conjuntos de brasagem.  |