



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**SAMARA ALVES LOPES**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DA LIGA Al-Mg OBTIDA DOS  
LACRES DE LATAS PARA ACONDICIONAMENTO DE BEBIDAS SOLIDIFICADOS  
ATRAVÉS DO METODO DE FUNDIÇÃO “SQUEEZE  
CASTING”**

**MARABÁ**

**2017**

SAMARA ALVES LOPES

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DA LIGA Al-Mg OBTIDA DOS  
LACRES DE LATAS PARA ACONDICINAMENTO DE BEBIDAS SOLIDIFICADOS  
ATRAVÉS DO METODO DE FUNDIÇÃO “SQUEEZE  
CASTING”**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Materiais da  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
em cumprimento as exigências para obtenção  
do grau de Bacharel em Engenharia de  
Materiais. Orientador: Prof. Márcio Paulo de  
Araújo Mafra

MARABÁ

2017

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Lopes, Samara Alves

Avaliação da tenacidade ao impacto da liga Al-Mg obtida dos lacres de latas para acondicionamento de bebidas solidificados através do método de fundição “Squeeze Casting” / Samara Alves Lopes; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2017.

1. Fundição. 2. Ligas de alumínio. 3. Metais - Corte. 4. Resistência mecânica. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 671.2

---

SAMARA ALVES LOPES

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DA LIGA Al-Mg OBTIDA DOS  
LACRES DE LATAS PARA ACONDICINAMENTO DE BEBIDAS SOLIDIFICADOS  
ATRAVÉS DO METODO DE FUNDIÇÃO “SQUEEZE  
CASTING”**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Materiais da  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
em cumprimento as exigências para obtenção  
do grau de Bacharel em Engenharia de  
Materiais.

**DATA DA AVALIAÇÃO:**

**CONCEITO:** \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra  
ORIENTADOR – UNIFESSPA – IGE – FEMAT

---

Prof. Dr. Elias Fagury Neto  
MEMBRO – UNIFESSPA – IGE – FEMAT

---

Prof. Jailes de Santana Moura  
MEMBRO – UNIFESSPA – IGE – FEMAT

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus primeiramente que me sustentou até aqui, através de toda proteção, força, saúde e sabedoria que sempre me foi concedida.

Aos meus pais, minha profunda e eterna gratidão, pela educação, suporte, por todo esforço e dedicação durante esses 5 anos de graduação. Agradeço também a minhas irmãs, familiares e amigos, por apoiarem sempre meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. Marcio Mafra, pela orientação, disponibilidade, atenção, paciência, compreensão e por toda ajuda para que fosse possível a realização desse trabalho.

À minhas amigas: Dayane, Maria Rita e Pâmella, pela amizade que se estenderá além da graduação, pelo apoio, companheirismo e por todos os momentos (bons e ruins) compartilhados. Agradeço também aos meus amigos Wilker, Wirland, Hilbenária, Paulo e Fiama, pelos momentos de descontração e pela solicitude nas horas necessárias. Estendo minha gratidão aos colegas da FEMAT e colegas de turma que me ajudaram de alguma forma durante esses anos de convivência.

E por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuiu para minha formação.

## RESUMO

As tecnologias da fundição são a base de toda a indústria metalomecânica. Todos os componentes fabricados em metais têm, em alguma fase do seu processo produtivo, a intervenção de alguma das tecnologias da fundição. Isto deve-se à capacidade única que estas têm de dar forma a componentes de complexidade variável, de um modo rápido e econômico. Dentre os processos de fabricação de componentes metálicos, o *squeeze casting* dentro da fundição é um processo inovador, no qual assegura características mecânicas superiores aos métodos de fundição convencionais devido à formação de estruturas finas e densas, e sobretudo devido à eliminação das porosidades e rechupes, que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas dos fundidos. O processo consiste no vazamento do metal no estado líquido dentro de uma coquilha metálica e sua solidificação ocorre sob pressão ocasionada pelo pressionamento de um punção. Este aplicado às ligas de Alumínio e Magnésio modifica consideravelmente a estrutura do metal quando comparado aos demais métodos. Desta forma, este trabalho buscou avaliar a influência da solidificação sob pressão (*squeeze casting*) na tenacidade ao impacto da liga Al-Mg proveniente dos lacres de latas para acondicionamento de bebidas. Verificou-se que a utilização da fundição sob pressão utilizando 100 MPa, aliada a outros parâmetros operacionais e aos parâmetros térmicos escolhidos, resultou em altas taxas de extração de calor, comprovada através da revelação macroestrutural do lingote sem porosidade e com grão refinados de tamanhos não uniforme. Essas variáveis tiveram forte relação nos resultados de resistência mecânica constatados a partir dos ensaios de dureza e impacto (Ensaio Charpy), que apresentaram relação inversa, visto que para maiores valores de energia absorvida, resultou em menores valores de dureza.

**Palavras-chave:** Liga Al-Mg; *Squeeze Casting*; Resistência mecânica.

## ABSTRACT

Foundry technologies are the basis of all the metal-mechanic industry. All components manufactured in metals have, at some stage of your production process, the intervention of some casting technologies. This is due to the unique ability that they must form the components of variable complexity, quickly and cost-effectively. Among the manufacturing processes of metal components, the squeeze casting in foundries is an innovative process, which assures mechanical characteristics superior to conventional casting methods due to thin and dense structures, and especially due to the elimination of porosity and gas holes, which directly influence the mechanical properties of fused. The process consists in the leakage of the metal in the liquid state into a metal shell and its solidification occurs under pressure caused by the pressing of a punch. This applied to aluminum and magnesium alloys considerably modifies the structure of the metal when compared to other methods. This way , this study sought to assess the influence of solidifying under pressure (squeeze casting) on impact toughness of Al-Mg alloy from the seals for packaging of drinks cans. It was found that the use of pressure die casting using 100 MPa combined with other operational parameters and the thermal parameters chosen, resulted in high rates of heat extraction, proven through the ingot macrostructural revelation without porosity and grain equiaxiais of non-uniform sizes. These variables had strong relationship on the results of mechanical resistance observed from the hardness testing and impact (Charpy Test).

**Keywords:** Alloy Al-Mg, Squeeze Casting, Mechanical resistance.

## LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS

Al – Elemento químico Alumínio

Al-Mg – Liga Alumínio Magnésio

EDS – Energy Dispersive X – ray Spectrometry

HB – Dureza Brinell

HRF – Hockwell escala F

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mg – Elemento químico Magnésio

MO – Microscópio óptico

O – Elemento químico Oxigênio

SC – Squeeze Casting

Si – Elemento químico Silício



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> – Esquema do processo <i>squeeze casting</i> : (a) fusão do metal, pré-aquecimento e lubrificação, (b) vazamento na coquilha, (c) solidificação do metal sob pressão, (d) ejeção da peça, limpeza da coquilha e recarga. .... | 19 |
| <b>Figura 2</b> – Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta. ....  | 20 |
| <b>Figura 3</b> – Classificação dos tipos de fundição sob pressão levando-se em conta a geometria da peça: (a) direta, (b) com extrusão e (c) indireta. ....  | 21 |
| <b>Figura 4</b> – Representação esquemática de macroestruturas de solidificação. ....   | 27 |
| <b>Figura 5</b> – Representação esquemática do crescimento de grãos na zona coquilhada e surgimento da zona colunar. ....   | 28 |
| <b>Figura 6</b> - Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais. ....   | 29 |
| <b>Figura 7</b> : Dureza Brinell. ....  | 31 |
| <b>Figura 8</b> – a) Esboço do equipamento para ensaio de impacto e b) representação do resultado fornecido pelo ensaio. ....   | 32 |
| <b>Figura 9</b> – Corpos de Prova para Ensaio de Impacto. ....  | 35 |
| <b>Figura 10</b> : a) e b) Coleta dos lacres. c) Lingotes. ....   | 37 |
| <b>Figura 11</b> : Fluxograma do Procedimento Experimental. ....  | 38 |
| <b>Figura 12</b> : a) lingoteira de aço ASTM 1045; b) prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas semi-automático da marca HIDRAUMAX. ....  | 39 |
| <b>Figura 13</b> : (a) Cadinho de carbetto de silício. (b) Forno Elétrico. (c) Termopar. ....   | 40 |
| <b>Figura 14</b> : (a) Metal líquido sendo vazado no interior da lingoteira já pré-aquecida a uma temperatura de 300°C. (b) Aplicação da pressão com o punção sob o metal líquido na lingoteira. (c) Lingote já solidificado. ....            | 41 |
| <b>Figura 15</b> : Lingote seccionado para confecção dos corpos de prova. ....  | 42 |
| <b>Figura 16</b> : Amostra para metalografia e dureza da liga Al-Mg. ....   | 43 |
| <b>Figura 17</b> : Microscópio ótico, marca OLYMPUS BX 51. ....   | 44 |
| <b>Figura 18</b> : Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Modelo HITACHI TM 3000 e aceleração de voltagem de 15KV com EDS (Energy Dispersive X – ray Spectrometry) Modelo SwiftED3000 acoplado. ....                                       | 44 |
| <b>Figura 19</b> : Durômetro de bancada PANTEC. ....  | 45 |
| <b>Figura 20</b> : Dimensões dos corpos de prova Charpy tipo A e esquema do corpo de prova. ....  | 46 |
| <b>Figura 21</b> : Corpos de prova para ensaio de impacto. ....   | 46 |
| <b>Figura 22</b> : Máquina de ensaio utilizada. ....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 23:</b> Macroestrutura de solidificação da liga Al-Mg com estrutura 100% equiaxial. ....  | 49 |
| <b>Figura 24:</b> EDS da primeira área analisada da amostra. ....   | 50 |
| <b>Figura 25:</b> EDS da sétima área analisada da amostra.....  | 51 |
| <b>Figura 26:</b> EDS da oitava área analisada da amostra. ....   | 52 |
| <b>Figura 27:</b> EDS da décima área analisada da amostra. ....   | 53 |
| Figura 28: Diagrama de fases Al-Mg. ....  | 54 |
| <b>Figura 29:</b> Microestrutura da liga Al-4%Mg: a) Aumento 50X; b) Aumento 200X; c) Aumento 500X; d) Aumento 1000 X. ....   | 55 |
| <b>Figura 30:</b> Amostra logo após a realização do ensaio de dureza. ....  | 56 |
| <b>Figura 31:</b> Fratura dos corpos de prova. ....   | 59 |
| <b>Figura 32:</b> Face de fratura dos corpos de prova ensaiado ao impacto a temperatura ambiente analisada com auxílio de uma lupa. Aumento de 80X. a) e b) Fractografia dos corpos de prova com maiores valores de energia absorvida. c) e d) Valores intermediários. e) e f) baixos valores. .... | 60 |
| <b>Figura 33:</b> Gráfico de Dureza x Impacto.....  | 61 |
| <b>Figura 34:</b> Gráfico do comparativo do valor médio e desvio padrão dos resultados de dureza HB e Energia de Impacto.....   | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> – Propriedades mecânicas de algumas ligas comerciais obtidas por diferentes processos de fabricação. .... | 22 |
| <b>Tabela 2:</b> Análise química dos dez espectros realizados.....  | 54 |
| <b>Tabela 3:</b> Ensaio de dureza Rockwell F (HRF) realizado, e transformação para valores de dureza Brinell (HB). ....   | 57 |
| <b>Tabela 4:</b> Resultado do ensaio de impacto (Energia Absorvida – Joule (J)).....                                      | 58 |

## SUMÁRIO

|               |   |           |
|---------------|---|-----------|
| <b>1.</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2.</b>     | <b>OBJETIVOS .....</b>  | <b>15</b> |
| 2.1.          | OBJETIVOS GERAIS.....   | 15        |
| 2.2.          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 15        |
| <b>3.</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>16</b> |
| 3.1.          | LIGA Al-Mg UTILIZADA NA FABRICAÇÃO DE LACRES DE LATAS PARA ACONDICIONAMENTO DE BEBIDAS..... | 16        |
| 3.2.          | LIGAS DO SISTEMA Al-Mg.....   | 17        |
| 3.3.          | <i>SQUEEZE CASTING</i> .....  | 18        |
| <b>3.3.1.</b> | <b>Mecanismo do Processo <i>Squeeze Casting</i>.....</b>                                    | <b>19</b> |
| <b>3.3.2.</b> | <b>Parâmetros do processo .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>3.3.3.</b> | <b>Microestrutura .....</b>   | <b>24</b> |
| <b>3.3.4.</b> | <b>Defeitos e métodos de prevenção .....</b>  | <b>25</b> |
| 3.4.          | CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO .....                                       | 26        |
| <b>3.4.1.</b> | <b>Formação da Estrutura Bruta de Fusão.....</b>  | <b>26</b> |
| 3.5.          | ENSAIO DE DUREZA .....  | 29        |
| 3.6.          | ENSAIO DE IMPACTO .....   | 32        |
| <b>3.6.1.</b> | <b>Ensaio de impacto em corpos de prova entalhados .....</b>                                | <b>34</b> |
| 3.7.          | TENACIDADE AO IMPACTO.....  | 35        |
| <b>4.</b>     | <b>METODOLOGIA.....</b>   | <b>37</b> |
| 4.1.          | MATERIAL.....   | 37        |
| 4.2.          | MÉTODOS .....   | 38        |
| 4.3.          | <i>SQUEEZE CASTING</i> .....  | 39        |
| 4.4.          | OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....  | 41        |
| <b>4.4.1.</b> | <b>Análise macroestrutural, micro estrutural e química .....</b>                            | <b>42</b> |
| 4.5.          | ENSAIO DE DUREZA .....  | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.5.1. Análise de resistência ao impacto .....</b> | <b>45</b> |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                | <b>48</b> |
| 5.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL.....                     | 48        |
| 5.2. ANÁLISE QUÍMICA.....                             | 49        |
| 5.3. ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....                    | 55        |
| 5.4. DUREZA .....                                     | 56        |
| 5.5. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....           | 57        |
| 5.6. COMPARATIVO ENTRE DUREZA E TENACIDADE.....       | 60        |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>                             | <b>63</b> |
| 6.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL.....                     | 63        |
| 6.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....                    | 63        |
| 6.3. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO E DUREZA.....  | 63        |
| 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....              | 65        |
| <b>8. REFERÊNCIAS.....</b>                            | <b>66</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O Alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações. Dentre a vasta aplicação das ligas de alumínio, encontra-se a utilização na fabricação de latas para acondicionamento de bebidas. De acordo com Oliveira et., al (2009), O Brasil é um dos grandes consumidores de latas de alumínio para acondicionamento de bebidas, porém, as latas recicladas fornecem uma liga com uma composição química que impede sua aplicação de forma abrangente. O lacre, assim como a tampa são feitos de uma liga de alumínio mais resistente do que a do corpo da lata, visto que sua composição é Al-Mg. Esta liga possui boa resistência mecânica, conformabilidade, elevada ductilidade, excelente resistência a corrosão, soldabilidade e, boa tenacidade (resistência a fratura).

As ligas de alumínio são amplamente fabricadas por *squeeze casting*, e dentre os não ferrosos são as mais produzidas, seguidas pelas ligas de cobre, magnésio e zinco. As aplicações incluem componentes automotivos como pistões, discos de freio, rodas e cubos, componentes de mísseis e engrenagens (DORIC e VERMA, 1988).

Entre todos os métodos de fundição o conhecido como *squeeze casting* tem destaque por estar dentre os inovadores. O processo de *squeeze casting* consiste basicamente na solidificação do metal em um molde metálico sob a aplicação de altas pressões unindo qualidade, economia e simplicidade. O processo tenta combinar as vantagens das tecnologias de fundição e forjamento. A pressão aplicada e o contato instantâneo do metal - líquido com a superfície do molde gera uma condição de rápida transferência de calor e produz uma peça livre de poros e de granulação fina, o que resultam numa melhora das propriedades mecânicas, em geral. O intuito da utilização deste método é de minimizar os defeitos obtendo assim maior eficiência e confiabilidade nos resultados (DORIC e VERMA, 1988; FERREIRA, 1999).

De acordo com SANTOS (2013) o comportamento de fratura de ligas fundidas por *squeeze casting* é bastante perceptível comparando-se com outros métodos de fundição. Devido a menor formação de poros, ligas fundidas por *squeeze casting* apresentam menor tendência à fratura frágil. Os poros em geral propiciam a propagação de trincas, ocasionando fraturas frágeis.

Desta forma, o estudo do processo *squeeze casting* se constitui num importante campo de pesquisa científica e tecnológica na área de materiais. Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação da tenacidade ao impacto da liga metálica de lacres de latas para acondicionamento de bebidas solidificados pelo método de fundição *squeeze casting*.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a tenacidade ao impacto da liga Al-Mg obtida dos lacres de latas para acondicionamento de bebidas solidificados através do método de fundição “squeeze casting”.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Fundir os lacres e desenvolver as amostras da liga Al-Mg, pelo método *squeeze casting*, para então analisa-las.

Caracterizar quimicamente a liga.

Avaliar a influência dos parâmetros operacionais (Pressão e Tempo de prensagem) na macroestrutura de solidificação e as alterações nas suas propriedades mecânicas (Dureza, Impacto).

Analisar a influência do *squeeze casting* na microestrutura da liga.

Avaliar as resistências mecânica da liga através dos ensaios de Impacto (Ensaio de Charpy) e Dureza.

Confrontar a tenacidade ao impacto com a dureza da liga.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. LIGA Al-Mg UTILIZADA NA FABRICAÇÃO DE LACRES DE LATAS PARA ACONDICIONAMENTO DE BEBIDAS

A característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas, torna o alumínio o metal de escolha, principalmente em embalagens para bebidas carbonatadas (ABAL, 2004). O corpo da lata precisa ser fino para manter seu custo reduzido. A tampa e a base precisam ser mais resistentes. As tampas representam cerca de 25% do peso total da lata e tem como características essenciais a qualidade e a resistência. De acordo com ABRALATAS (2004) elas são feitas de uma liga de alumínio mais resistente (com menos manganês e mais magnésio) que a do corpo da lata e recebem verniz de ambos os lados.

Diferentemente do corpo da lata que é fabricado de uma liga de alumínio-manganês, os lacres são fabricados da liga alumínio-magnésio. O magnésio além de conferir maior resistência mecânica permite a essas ligas manterem um elevado nível de ductilidade, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade.

Há uma polêmica acerca da reciclagem do lacre como matéria-prima na indústria metalúrgica. Pois o lacre propriamente dito não tem valor comercial para a reciclagem, somente em conjunto com a lata é que há o valor. Por este motivo, foi inventado o sistema "stay-on-tab", para que o lacre não se solte da lata. A razão disso diz respeito principalmente em relação a composição da liga metálica que ele é fabricado. As ligas de alumínio são constituídas por pequenas porcentagens de cobre, silício, magnésio e zinco. O lacre tem uma composição bem pobre de alumínio. Segundo Patricia Lattavo, coordenadora de comunicação da empresa Latasa, ao retirar o anel da lata, dificulta-se a sua reciclagem porque o rendimento da reciclagem é reduzido. “Como a liga do qual é feito o anel contém alto teor de magnésio e este tem a maior potencial de oxidação que o alumínio, se ele (o anel) não estiver junto com a lata, fica mais fácil sua oxidação no forno. Essa característica reduz o rendimento da reciclagem dos lacres nos fornos que derretem o material. Por este motivo, as recicladoras de alumínio aceitam o lacre junto da latinha, mas não separado (SUCATAS.COM, 2016).”



### 3.2. LIGAS DO SISTEMA Al-Mg

As ligas Al-Mg (série 5XXX) constituem um importante grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, ou sejam, não são endurecíveis por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, mas sim por solução sólida e encruamento (trabalho mecânico). Além desse ganho de resistência mecânica, o magnésio permite a essas ligas manterem um elevado nível de ductilidade, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade. O Mg é um dos elementos mais efetivos no endurecimento do Al (ALUMINIO E SUAS LIGAS, 2013).

Quando utilizado como elemento principal ou em conjunto com o Mn, o resultado são ligas não tratáveis com resistência moderada à elevada. O Mg é considerado mais efetivo que o Mn como endurecedor, (0,8% de Mg tem o mesmo efeito sobre a resistência que 1,25% de Mn) e ainda, pode ser adicionado em quantidades elevadas (~15%) (ALUMINIO E SUAS LIGAS, 2013).

A temperatura eutética dessas ligas é 450 °C e o teor de magnésio que corresponde ao ponto eutético é de 35 %. A fase em equilíbrio com o alumínio é a Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> (37,3 % de magnésio), embora esta composição esteja um pouco fora da faixa que corresponde a essa estequiometria (34,8 a 37,1 %). A fase Al<sub>8</sub>Mg<sub>5</sub> (36% de magnésio) corresponde à composição da fase sólida e é muito facilmente encontrada nas ligas Al-Mg. A solidificação em condições de não equilíbrio leva à segregação, com a fase Al<sub>8</sub>Mg<sub>5</sub> aparecendo para teores de magnésio tão baixos como 4 ou 5 %. Esta fase é frágil abaixo de 330 °C, mas apresenta alguma plasticidade em temperaturas mais altas (NUNES, 1990).

As ligas Al-Mg são aquelas que possuem a melhor combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e ductilidades, possuindo propriedades mecânicas intermediárias entre as das ligas da série 3XXX (Al-Mn) e as ligas endurecíveis por precipitação (Al-Cu, Al-Mg-Si e Al-Zn-Mg, séries 2XXX, 6XXX e 7XXX respectivamente) (BARBOSA et. al., 1991). São utilizadas em aplicações nas quais se exige razoável resistência mecânica com excelente resistência à corrosão. Ligas Al-Mg com teores variando entre 3 e 5 % são muito utilizadas na indústria naval, na fabricação de diversos componentes de navios (DIOGENES, 2011). As ligas 5042, 5352, 5082 e 5182 são usadas na fabricação de tampas para latas de bebidas, mais frequentemente as ligas 5082 e 5182. A liga 5182, assim como a 5052, também é usada na indústria automobilística. As ligas 5356, 5554 e 5556 são usadas como metais de adição na soldagem (PICKERING, 1997).

### 3.3. SQUEEZE CASTING

A fundição é o processo de fabricação mais econômico para se transformar material bruto em ferramentas uteis, mas assim como os outros processos ela apresenta suas falhas. Uma das maiores falhas para a fundição convencional, ou mesmo para técnicas avançadas de fundição, é a formação de defeitos tais como porosidade e defeitos de segregação. Por esse motivo novas técnicas de fundição foram desenvolvidas para compensar tais problemas, entre essas técnicas o *squeeze casting* possui grande potencial para criar componentes fundidos com menos defeitos.

Segundo GHOMASHCHI (2000) *squeeze casting* é um termo genérico para especificar uma técnica de fabricação onde a solidificação é realizada sob alta pressão em um molde permanente, como nos processos de fundição sob pressão convencionais. As principais diferenças encontram-se nos estágios intermediários de processamento, neste processo, o metal é vazado no molde aberto e só depois de fechado é que se aplica a alta pressão. A técnica é econômica e relativamente simples, possuindo grande potencial para automatização e altas taxas de produção.

O processo *squeeze casting* tenta combinar as vantagens das tecnologias de fundição e forjamento: a pressão aplicada e o contato instantâneo do metal líquido com a superfície do molde geram uma condição de rápida transferência de calor e produz uma peça livre de poros e de granulação fina; esta peça tem propriedades mecânicas próximas daquelas de um produto forjado combinadas com as formas e baixo custo das peças fundidas (DORIC e VERMA, 1988; FERREIRA, 1999).

Este processo é destinado principalmente à produção de componentes fundidos de alta integridade (baixa porosidade) e alto desempenho em relação a propriedades mecânicas, portanto em geral os componentes fabricadas por *squeeze casting* possuem granulação fina, excelente acabamento de superfícies e quase livre de porosidade, os mesmo podem ser de diferentes tamanhos e formatos, as propriedades mecânicas são aumentadas significativamente, em comparação ao método tradicional de fundição e, além disso, peças fabricadas por *squeeze casting* possuem soldabilidade superior e são aptas a tratamentos térmicos, e finalmente em comparação com a fundição comum, peças fabricadas por *squeeze casting* são formadas em uma só operação com um consumo menor de energia.

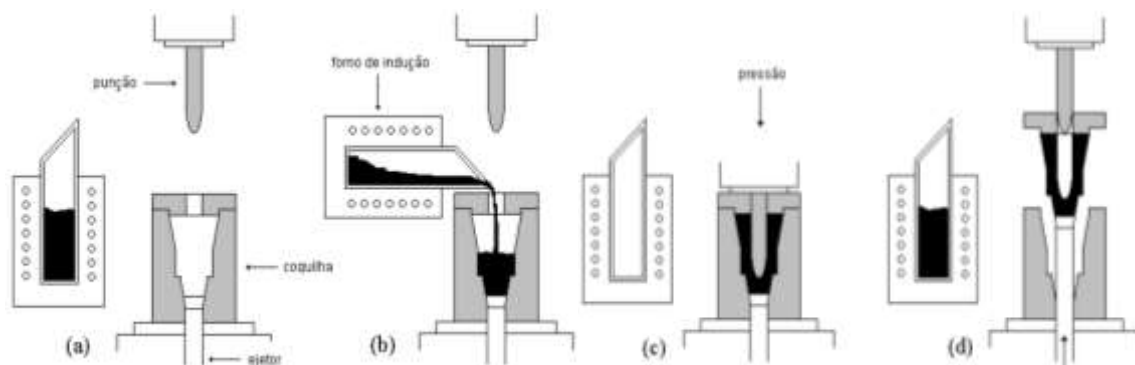
Atualmente, componentes de ligas de alumínio, cobre, magnésio, ferro fundido, aços inoxidáveis e de superligas a base de níquel são facilmente fabricados por *squeeze casting* (HU, 1998).

### 3.3.1. Mecanismo do Processo *Squeeze Casting*

No processo *squeeze casting* o metal, após fusão e vazamento, solidifica sob pressão dentro de um molde permanente posicionado entre as placas de uma prensa hidráulica. O processo é mostrado esquematicamente na Figura 1 e pode ser dividido em quatro etapas (HU, 1998).

- Uma coquilha ou molde de aço apropriado é instalado sobre a base de uma prensa hidráulica. O conjunto é pré-aquecido até a temperatura de trabalho desejada. Durante o pré-aquecimento a coquilha é revestida com material refratário ou grafite para facilitar a desmoldagem.
- Uma quantidade exata de metal fundido é vazada dentro do molde. Após o vazamento, o punção, é abaixado entrando em contato com o metal líquido;
- A pressão é aplicada logo após o metal começar a solidificar e é mantida até que todo metal esteja solidificado;
- O punção retorna para sua posição original e a peça fundida é ejetada.

**Figura 1** – Esquema do processo *squeeze casting*: (a) fusão do metal, pré-aquecimento e lubrificação, (b) vazamento na coquilha, (c) solidificação do metal sob pressão, (d) ejeção da peça, limpeza da coquilha e recarga.



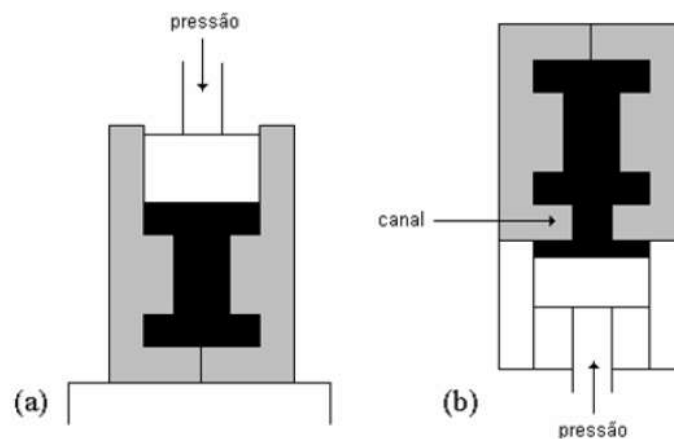
Fonte: Hu, (1998).

Segundo HU (1998), existem dois tipos de *squeeze casting*: prensagem direta e indireta. A técnica de prensagem direta é caracterizada pela imposição da pressão diretamente sobre a superfície total da peça, como mostrado na Figura 2(a). Com esta técnica se obtém máxima densidade e a transferência de calor é extremamente rápida resultando em um material de granulação fina e com excelentes propriedades mecânicas.

A técnica de pressão indireta é mostrada na Figura 2(b). Neste caso o metal líquido é vazado em um recipiente ligado à coquilha por um canal; o metal é pressionado preenchendo assim a coquilha. Com a coquilha cheia a pressão é exercida apenas sobre o metal que ainda está no recipiente sendo transmitida para a peça indiretamente pelo canal. Com esta técnica é difícil manter a peça sobre alta pressão durante todo o tempo de solidificação, ou seja, é difícil trabalhar com ligas possuindo grande intervalo de solidificação. Embora a técnica direta seja muito melhor que a indireta do ponto de vista da qualidade da peça, a técnica indireta é muito mais utilizada industrialmente porque, neste caso, um sistema de vazamento preciso não é necessário em contraste com a técnica direta onde se deve vaziar a exata quantidade de metal da peça o que é, sem dúvida, difícil de controlar.

Alternativamente, levando-se em consideração a forma da peça, a prensagem também pode ser classificada como direta, com extrusão e indireta (Figura 3) (FERREIRA, 1999).

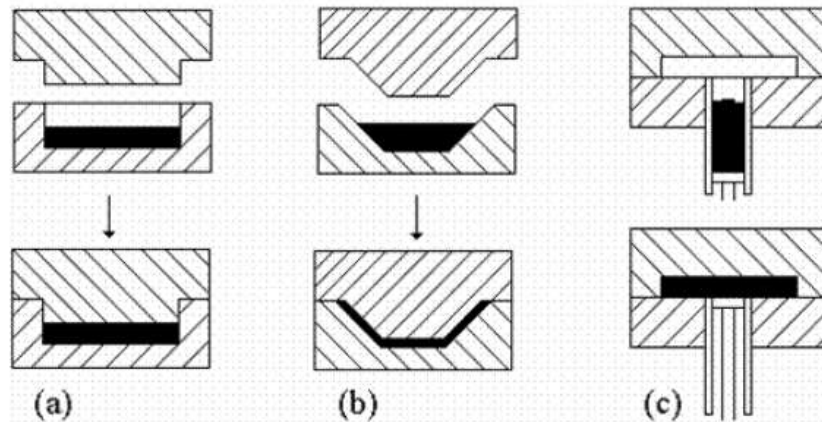
**Figura 2** – Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta.



**Fonte:** Hu, (1998).

**Figura 3** – Classificação dos tipos de fundição sob pressão levando-se em conta a geometria da peça:

(a) direta, (b) com extrusão e (c) indireta.



**Fonte:** Ferreira, (1999).

O processo *squeeze casting* combina a fundição e o forjamento em um único processo onde o metal líquido é solidificado ao mesmo tempo que sofre uma pressão hidrostática: a pressão aplicada e o contato instantâneo do metal líquido com a superfície do molde gera uma condição de rápida transferência de calor e produz uma peça livre de poros e de granulação fina; esta peça tem propriedades mecânicas próximas daquelas de um produto forjado combinadas com as formas e baixo custo das peças fundidas (GHOMASHCHI e VIKHROV, 2000; FERREIRA, 1999).

A Tabela 1 compara valores de propriedades mecânicas para algumas ligas comerciais fundidas por processos convencionais ou *squeeze casting* e forjadas.

**Tabela 1** – Propriedades mecânicas de algumas ligas comerciais obtidas por diferentes processos de fabricação.

| Liga                         | Processo       | Tensão de Ruptura (MPa) | Tensão de Escoamento (MPa) | Elongação (%) |
|------------------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|---------------|
| Alumínio 356-T6              | Squeeze        | 309                     | 265                        | 3             |
|                              | Coquilha       | 262                     | 186                        | 5             |
|                              | Areia          | 172                     | 138                        | 2             |
| Alumínio 6061-T6             | Squeeze        | 292                     | 268                        | 10            |
|                              | Forjament<br>o | 262                     | 241                        | 10            |
| Latão CDA 377                | Squeeze        | 379                     | 193                        | 32            |
|                              | Extrusão       | 379                     | 145                        | 48            |
| Bronze de alumínio<br>CD 624 | Squeeze        | 783                     | 365                        | 13,5          |
|                              | Forjamento     | 703                     | 345                        | 15            |

**Fonte:** Doric e Verma, (1988).

A elevada pressão aplicada, em torno de 70 MPa, é suficiente para evitar a formação de porosidade; além disso, a tendência à formação de poros é limitada pelo uso de um superaquecimento mínimo, este último é possível porque na fundição sob pressão a fluidez do metal líquido, que requer altas temperaturas de vazamento, não é necessária para o preenchimento da coquilha o qual é obtido pela aplicação da pressão. Nas seções mais espessas da peça, onde existe maior probabilidade de aparecimento de porosidade, a pressão faz com que o metal líquido que se encontra nos pontos mais quentes seja deslocado para preencher os poros que estão se formando, impedindo com isso seu desenvolvimento. Este mecanismo é bastante satisfatório em ligas com grande intervalo de solidificação, obtendo-se peças muito homogêneas sem a necessidade de pressões muito altas (acima de 100 MPa) (DORIC e VERMA, 1988; FERREIRA, 1999).

O comportamento de fratura de ligas fundidas por *squeeze casting* é bastante perceptível comparando-se com outros métodos de fundição. Devido a menor formação de poros, ligas fundidas por *squeeze casting* apresentam menor tendência à fratura frágil. Os poros em geral propiciam a propagação de trincas, ocasionando fraturas frágeis.

### 3.3.2. Parâmetros do processo

Existem muitas variáveis que devem ser controladas a fim de garantir-se a qualidade das peças fundidas através de *squeeze casting*. Estes parâmetros variam, em geral, com o tipo de liga utilizada e com a geometria da peça e são os seguintes (HU, 1998; DORIC e VERMA, 1988; FERREIRA, 1999):

- *Volume de metal fundido* – é um parâmetro crítico da fundição por pressão direta, pois as dimensões finais da peça dependem da quantidade de metal inserido na coquilha antes da aplicação da pressão. Existem vários métodos de controle de vazamento e outros onde o excesso de metal é direcionado para uma região da peça que posteriormente será cortada.
- *Temperatura de vazamento* – a temperatura de vazamento influencia bastante a qualidade da peça e a vida útil da coquilha. Temperatura demasiado elevada diminuiu a esperança de vida da coquilha e aumenta a probabilidade de intrusões de óxidos no banho. Por outro lado, temperatura demasiado baixa promove solidificações prematuras e dificulta o enchimento em zonas finas.

Devido às características do processo não há necessidade de altas temperaturas de vazamento com o objetivo de aumentar a fluidez do líquido, uma vez que o preenchimento da coquilha é obtido através da pressurização; desta forma pode-se trabalhar com uma fluidez relativamente baixa. Além disso, altas temperaturas de vazamento podem danificar as ferramentas e provocar o aparecimento de porosidades em seções espessas da peça.

O superaquecimento depende de vários fatores tais como o intervalo de solidificação do metal e a complexidade da geometria da peça, além da temperatura de início de solidificação. Pequenos intervalos de solidificação requerem superaquecimentos maiores. Usualmente a temperatura de vazamento varia de 6 a 55°C, entretanto pode variar entre 10 e 100°C para ligas de alumínio e de 30 a 140°C para ligas de magnésio (HU, 1998).

- *Temperatura das ferramentas* – as temperaturas de operação da coquilha e do punção são parâmetros que afetam diretamente a taxa de transferência de calor da peça. A temperatura das ferramentas deve ser suficientemente alta para evitar solidificação prematura, pontos frios sobre a superfície da peça e fadiga térmica nas ferramentas; por outro lado essas temperaturas não podem ser muito elevadas superaquecendo a coquilha porque isto pode causar pontos quentes e poros por contração da peça.

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

arrefecimentos prematuros (HANDBOOK, 2008). A temperatura do punção deve ser 15 a 30°C mais baixa que a menor temperatura da coquilha a fim de manter uma pequena tolerância entre ambos, essencial para uma ventilação eficaz.

- *Tempo de espera para pressurização* – é a duração entre o exato instante do vazamento e o instante em que a pressão é aplicada sobre o metal através do punção (ou pistão). Durante este período é estabelecida a melhor relação (*critical ratio*) entre a quantidade de metal líquido e metal sólido na coquilha. O tempo de espera varia bastante dependendo da temperatura de vazamento, complexidade da peça e do material; ele pode ser de poucos segundos para pequenas e complexas peças de ferro ou aproximadamente 1 minuto para grandes e simples peças de alumínio.
- *Tempo de duração da aplicação da pressão* – após a completa solidificação da peça e a obtenção de uma homogeneização da temperatura a pressão pode ser retirada. Para peças pesando até 10Kg, o tempo de aplicação da pressão pode variar entre 30 e 120s (DORCIC e VERMA, 1999)
- *Lubrificação* – É indicado o uso de lubrificantes antes do vazamento para facilitar a operação de desmoldação. No caso da fundição das ligas leves (alumínio, cobre, magnésio, etc.) são recomendados lubrificantes de grafite coloidal (HANDBOOK, 2008).
- *Pressão aplicada* – a pressão é, sem dúvida, o parâmetro que tem mais efeito sobre a peça fundida porque, principalmente, ela modifica a temperatura de solidificação da liga e aumenta a taxa de transferência de calor na interface metal-molde. Por sua vez, estas modificações afetam a microestrutura e as propriedades mecânicas do material. O nível de pressão a exercer depende da geometria do componente e das características mecânicas desejadas. No entanto, existe um nível de pressão ótimo a partir do qual aumentos da pressão não se refletem em melhorias das características mecânicas dos componentes. A literatura sugere valores entre 30 e 140 MPa como referência para este processo.

### 3.3.3. Microestrutura

Peças fundidas por *squeeze casting* apresentam uma estrutura compacta, livre de poros, de granulação fina e quase totalmente equiaxial em comparação com a fundição convencional em coquilha. Além da alta densificação, as excelentes propriedades mecânicas obtidas por *squeeze casting* se devem à microestrutura. Mesmo pressões moderadas causam um contato entre o metal fundido e a coquilha que aumenta 10 vezes a taxa de transferência de calor em



relação à fundição convencional em coquilha (DORCIC e VERMA, 1999). Esta alta taxa de transferência de calor resulta em uma estrutura de granulação fina, também proveniente do grande número de núcleos (para a solidificação) formados devido à baixa temperatura de vazamento e pressão aplicada.

A solidificação sob pressão e alta taxa de transferência de calor também minimizam a segregação que ligas forjadas tendem a apresentar. O uso de ligas forjadas como matéria-prima é possível porque, como já assinalado, não há necessidade de alta fluidez para o preenchimento do molde.

Em geral as dendritas e o espaçamento interdendrítico de peças fundidas sob compressão são menores que aqueles de peças fundidas na ausência de pressão (DORCIC e VERMA, 1999; SKOLIANOS et al., 1997).

#### **3.3.4. Defeitos e métodos de prevenção**

A qualidade e a reprodutibilidade das peças produzidas por *squeeze casting* depende da manutenção das variáveis otimizadas do processo. Desvios das condições ótimas de operação podem causar os seguintes defeitos (DORIC e VERMA, 1988; FERREIRA, 1999):

- Defeitos de Shrinkage – os defeitos de Shrinkage podem ocorrer quando a pressão aplicada é insuficiente para expulsar do metal líquido bolhas de ar que ficam aprisionadas. Esses defeitos podem ser minimizados aumentando-se a pressão aplicada.

- Inclusões de óxidos – resultam de uma limpeza deficiente dos sistemas de fusão e vazamento. Para diminuir a possibilidade de inclusões devem existir filtros ou redução da turbulência durante o vazamento.

- Poros superficiais – O ar ou gás presente no banho pode formar bolhas na superfície quando a pressão é retirada ou em tratamentos térmicos posteriores. Este problema é resolvido através de degaseificação antes do vazamento, uso de menor velocidade no fechamento da coquilha, aumento da ventilação ou redução da temperatura de vazamento.

- Macrossegregação – é um defeito habitualmente encontrado em ligas de alumínio forjadas em baixas temperaturas. Segundo GARCIA (2001) a macrossegregação é a segregação de longo alcance que é causada pelo movimento do líquido ou sólido e que provoca uma composição química que se difere da composição média. Esse movimento pode ser causado pela deformação da fase solidificada por ação de tensões térmicas ou da pressão. À medida que a solidificação vai começando nas paredes da lingoteira, a fase líquida vai tendo cada vez mais concentração de soluto de menor ponto de fusão, estando este aprisionado nas áreas centrais da

segregação por compressão. Para evitar este defeito, deve-se aumentar a temperatura da lingoteira, diminuir o tempo de espera ou escolher uma liga alternativa (FERREIRA, 1999).

### 3.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO

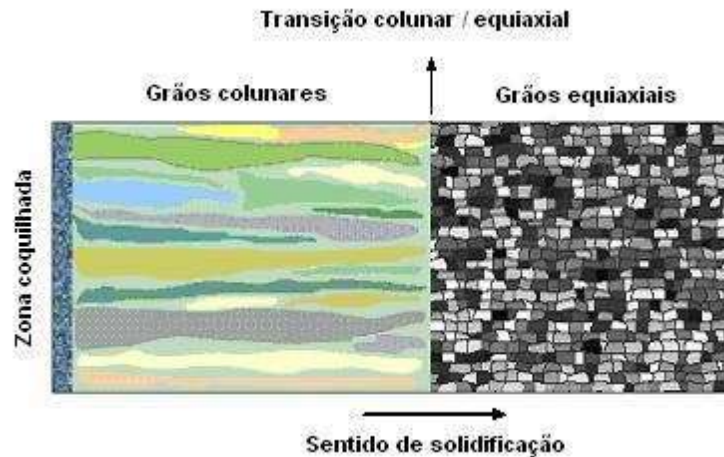
A solidificação de metais envolvida nos processos de fundição pode ser definida como um processo de extração de calor, com mudança de fase, no qual uma certa quantidade de energia térmica deve ser transferida, através do molde, da fase líquida para o meio ambiente para possibilitar a nucleação e crescimento da fase sólida. A eficiência da extração de calor durante o processo depende basicamente das propriedades térmicas do metal, das características do molde (material, geometria e espessura de parede), das condições da interface metal molde (contato térmico) e das características do meio que vai absorver calor (água, ar, etc....) (ANDRADE, 2006).

A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final. Quando a solidificação ocorre de forma controlada determina as características das propriedades mecânicas do material, como o tamanho do grão, composição química, espaçamento dendrítico, espaçamento lamelar, distribuição dos precipitados, distribuição das inclusões e a distribuição da porosidade (ANDRADE, 2006).

#### 3.4.1. Formação da Estrutura Bruta de Fusão

A solidificação se processa a partir da formação no líquido, de núcleos sólidos, que em condições termodinâmicas favoráveis crescem dando origem aos grãos cristalinos que definirão a macroestrutura da peça. A macroestrutura de um metal solidificado será então caracterizada pelos seus grãos cristalinos, ou seja, suas dimensões, orientação, forma e distribuição (GOULART, 2005). A formação da macroestrutura tanto nos metais puros, quanto nas ligas metálicas, é semelhante do ponto de vista macroscópico e no que diz respeito à disposição das estruturas. Essa macroestrutura pode se apresentar em três diferentes morfologias: coquilhada, colunar e equiaxial (SIQUEIRA et. al., 2003).

**Figura 4** – Representação esquemática de macroestruturas de solidificação.



**Fonte:** Siqueira et. al., (2003).

#### 3.4.1.1. Zona Coquilhada

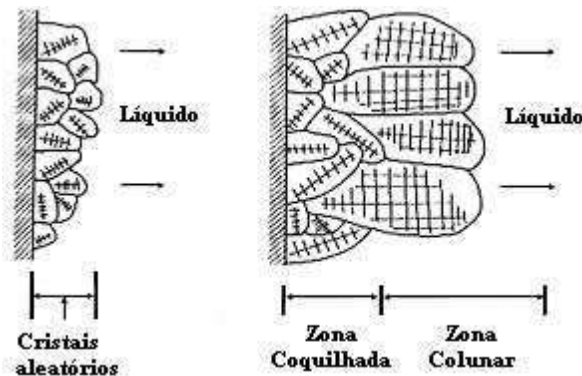
Segundo Garcia (2001), a zona coquilhada é constituída por uma camada de grãos cristalinos de orientações aleatórias, normalmente de pequenas dimensões, localizados junto às paredes do molde, resultado do primeiro contato do metal líquido com o molde frio no vazamento. As altas taxas de resfriamento obtidas irão provocar uma rápida diminuição local da temperatura e favorecer uma nucleação intensa de grãos. Esse decréscimo de temperatura ocasionará um super-resfriamento térmico; com isso, os primeiros grãos cristalinos começam a se desenvolver de forma e tamanho pequenos, quase sempre uniformes, constituindo uma fina camada de grãos de crescimento aleatório junto às paredes do molde.

#### 3.4.1.2. Zona Colunar

A zona colunar é constituída por grãos cristalinos alongados e alinhados paralelamente à direção do fluxo de calor. Inicia-se a constituição da zona colunar pelo crescimento de grãos formados a partir dos núcleos oriundos do rápido resfriamento do líquido nos instantes iniciais da solidificação, e que apresentam direção cristalográfica favorável ao crescimento na direção da extração de calor. Esses núcleos tendem a crescer mais rapidamente que os outros, bloqueando o crescimento dos demais grãos coquilhados. Os grãos assim formados possuem dimensões bem maiores que os grãos da zona coquilhada, apresentando ainda direções cristalográficas fortemente orientadas (GARCIA, (2001).

Os grãos que não tiverem direções favoráveis de crescimento serão bloqueados e impedidos de continuarem a crescer, originando a região denominada de zona colunar, conforme exibido no esquema da Figura 5.

**Figura 5** – Representação esquemática do crescimento de grãos na zona coquilhada e surgimento da zona colunar.



**Fonte:** Garcia, (2001).

A zona equiaxial ocorre quando a região central do lingote se torna super-resfriada tanto por efeito térmico quanto constitucional favorecendo o desenvolvimento de núcleos que podem crescer aleatoriamente na forma de cristais. Estes cristais são denominados de equiaxiais e impedem o desenvolvimento da zona colunar. A formação da zona equiaxial central é favorecida por altos teores de elementos de liga, baixos superaquecimentos, utilização de molde com baixa difusividade de calor e intenso movimento convectivo favorece o aumento desta zona (PERALTA, 2002).

De acordo com PERALTA (2002) como as propriedades mecânicas de estruturas brutas de solidificação, geralmente, apresentam tendência de aumentar com a diminuição do tamanho dos grãos, é desejável que estes se apresentem na forma equiaxial na grande maioria das situações práticas devido estas propriedades serem isotrópicas.

A escolha do tipo da macroestrutura desejada, dependerá fortemente das condições de projeto, da análise e conhecimento dos esforços mecânicos atuantes e principalmente da análise custo/benefício para obtenção da estrutura. Na grande maioria das situações práticas é desejável que a estrutura bruta de solidificação se apresente na forma de grãos equiaxiais, já que esse tipo de estrutura caracteriza-se pela isotropia de suas propriedades mecânicas. Para desenvolver estruturas completamente equiaxiais é preciso impedir o crescimento colunar, através do controle da nucleação, através das condições de solidificação ou adição de agentes inoculantes

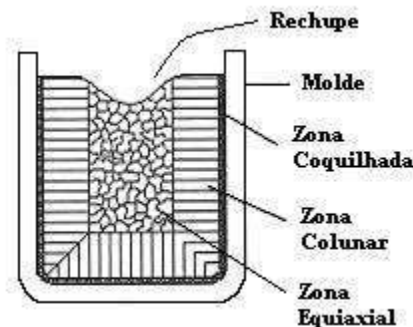
e a utilização de métodos físicos para produzir movimento forçado no metal líquido, podendo ser agitação mecânica ou indução eletromagnética (OSÓRIO et al., 2003).

Na fundição do alumínio a modificação da estrutura dendrítica para uma estrutura de grãos finos do tipo equiaxial é desejada para melhorar as propriedades mecânico-metalúrgicas da peça. Este tipo de estrutura apresenta várias vantagens, tais como (OSÓRIO et al., 2003):

- Minimização da contração;
- Eliminação das trincas a quente;
- Menor porosidade;
- Melhor resistência a tenacidade;
- Facilidade para laminação e/ou usinagem do fundido;

A Figura 6 mostra a representação esquemática das três zonas que podem constituir a macroestrutura de um lingote.

**Figura 6** - Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais.



**Fonte:** Garcia, (2001).

### 3.5. ENSAIO DE DUREZA

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos mais aplicados em engenharia utilizam-se de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga e carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica. A área da marca superficial formada ou a sua profundidade são medidas e correlacionada com um valor numérico que representa a dureza do material. Esta correlação é baseada na tensão de que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material (GARCIA, 2000).

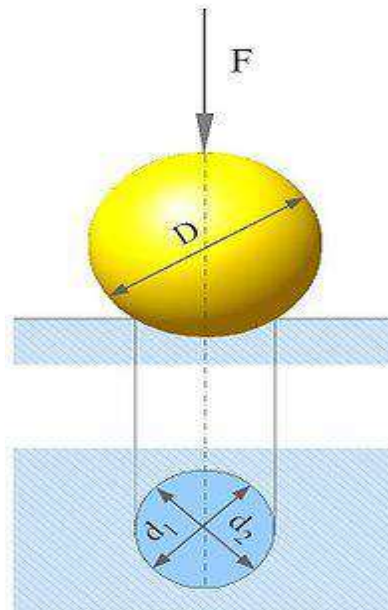
A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. Nos sólidos moleculares, como os plásticos, as forças atuantes entre as moléculas (forças de Van der Waals) são baixas, e eles são relativamente macios. Os sólidos metálicos e iônicos, devido à natureza mais intensa das forças de ligação, são mais duros, enquanto os sólidos de ligação covalente são os materiais conhecidos de maior dureza. A dureza dos metais pode também ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, endurecimento por precipitação ou tratamento térmico (GARCIA, 2000).

Na dureza por penetração, podemos destacar a dureza Brinell, Rockwell e Vickers.

O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera, de aço temperado ou de carbeto de tungstênio, de diâmetro (D), sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga (F), (a carga aplicada varia entre 500 e 3000 kgf), durante um tempo (t), produzindo uma calota esférica de diâmetro (d). A carga é mantida constante por um período entre 10 e 30 segundos. A razão entre a carga aplicada sobre a área da esfera é denominado dureza Brinell.

$$HB = \frac{2p}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad Eq. 1$$

Sendo que (P) é carga aplicada (em Kgf); (d) é o diâmetro da calota ou diâmetro da impressão (em mm) e (D) é o diâmetro do penetrador (em mm) (DOS SANTOS et., al 2008).

**Figura 7:** Dureza Brinell.

**Fonte:** Dos Santos et., al (2008).

O ensaio de dureza Rockwell é o método mais utilizado internacionalmente. Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob ação de uma carga como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área da impressão, como no caso da dureza Brinell. A dureza Rockwell pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo do penetrador e da pré-carga e carga aplicadas (GARCIA, 2000).

O penetrador tanto pode ser um diamante esferocônico com ângulo  $120^\circ$  e ponta ligeiramente arredondada ( $r=0,2\text{mm}$ ), como uma esfera de aço endurecido, geralmente com diâmetro de 1,59 mm, existindo também nos diâmetros de 3,17 mm, 6,35 mm e 12,70mm (GARCIA, 2000).

No caso de ensaio de dureza Rockwell, utilizam-se pré-carga de 98N (10kgf) e força (total) de 589N (60kgf); 981N (100kgf) e 1471 N (150kgf); e, para dureza superficial, pré-carga de 29N (3kgf) e forças de 147N (15kgf), 294N (30kgf) e 441N (45kgf). A aplicação da pré-carga é necessária para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais e ajudar na fixação do corpo-de-prova no suporte, além de causar pequena deformação permanente, eliminando erros causados pela deformação elástica (GARCIA, 2000).

A profundidade de penetração é correlacionada pela máquina de ensaio a um número arbitrário, cuja leitura é feita diretamente na escala da máquina, após a retirada da carga total, mantendo-se, entretanto, a carga inicial (GARCIA, 2000).

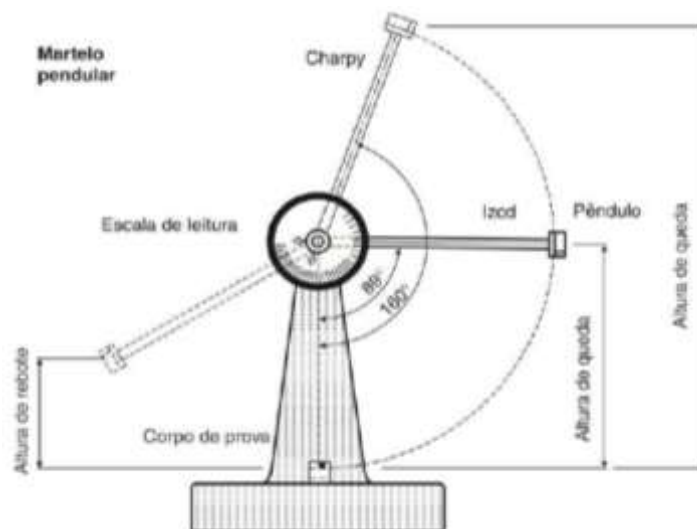
### 3.6. ENSAIO DE IMPACTO

Este é um dos ensaios que permitem estudar os efeitos das cargas dinâmicas, muito utilizado para medir a tendência de um metal de se comportar de maneira frágil. Como este trabalho foi realizado utilizando o método de fundição por *squeeze casting* e este ter como princípio a produção de peças de alta qualidade, portanto com menos defeitos de fundição e, sendo possível até a obtenção de componentes fundidos livres de defeitos logo diminui a tendência à fratura frágil, o ensaio de impacto se torna o mais indicado para que constatem uma minimização de defeitos e otimização de resistência.

O comportamento dúctil-frágil dos materiais pode ser mais amplamente caracterizado por ensaios de impacto. A carga nesses ensaios é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), e o impacto é obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. As massas utilizadas nos ensaios são intercambiáveis, possuem diferentes pesos e podem cair de alturas variáveis. Os ensaios mais conhecidos são denominados Charpy e Izod, dependendo da configuração geométrica do entalhe e do modo de fixação do corpo de prova na máquina (Figura 8). O ensaio Charpy é mais popular nos Estados Unidos, e o Izod, na Europa. Como resultado do ensaio, obtém-se a energia absorvida pelo material até a fratura, ou seja, a tenacidade ao impacto, além da resistência ao impacto relacionando-se a energia absorvida com a área da seção resistente (GARCIA, 2000).

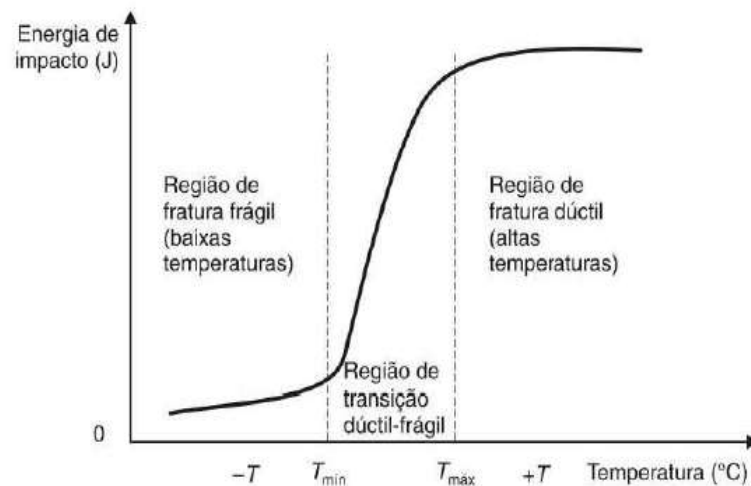
**Figura 8** – a) Esboço do equipamento para ensaio de impacto e b) representação do resultado fornecido pelo ensaio.

a) Equipamento para ensaio de impacto.



b) Curva resposta do ensaio de impacto.





**Fonte:** Garcia, (2000).

O ensaio de impacto é um dos primeiros e até hoje um dos ensaios mais empregados para o estudo de fratura frágil nos metais. Esse ensaio, às vezes denominado ensaio de choque ou impropriamente de ensaio de resiliência, é um ensaio dinâmico usado principalmente para materiais utilizados em baixa temperatura, como teste de aceitação do material (SOUZA, 1982).

Segundo CALLISTER (2000), no entanto, o resultado do ensaio é apenas uma medida de energia absorvida e não fornece indicações seguras sobre o comportamento do metal ao choque em geral, o que seria possível se pudesse ensaiar uma peça inteira sob as condições da prática. Neste contexto, sabe-se que, a existência de uma pequena trinca no metal faz com que, dependendo da temperatura, a ductilidade do material caia, de modo que aconteça a ruptura mesmo antes de ser atingido o seu limite de escoamento.

As condições dos ensaios de impacto foram escolhidas para representar aquelas condições potencialmente mais severas em relação a possibilidade de ocorrer fratura – quais sejam: (1) deformação a uma temperatura relativamente baixa, (2) uma taxa de deformação elevada e (3) um estado triaxial de tensão (que pode ser introduzido pela presença de um entalhe) (CALLISTER, 2000).

De qualquer forma, os testes são importantes e fundamentais para segurança dos materiais, visto que permite a observação de diferenças de comportamento entre materiais que não são observadas em um ensaio de tração, como o comportamento dúctil-frágil dos materiais que pode ser mais amplamente caracterizado através dos ensaios de impacto. Assim, os tipos de ensaio de impacto mais comuns são: Ensaio Charpy e Ensaio Izod. A diferenciação destes, ocorre pelos tipos de corpos de prova e o tipo de aparato de queda de peso (pêndulo) usado.

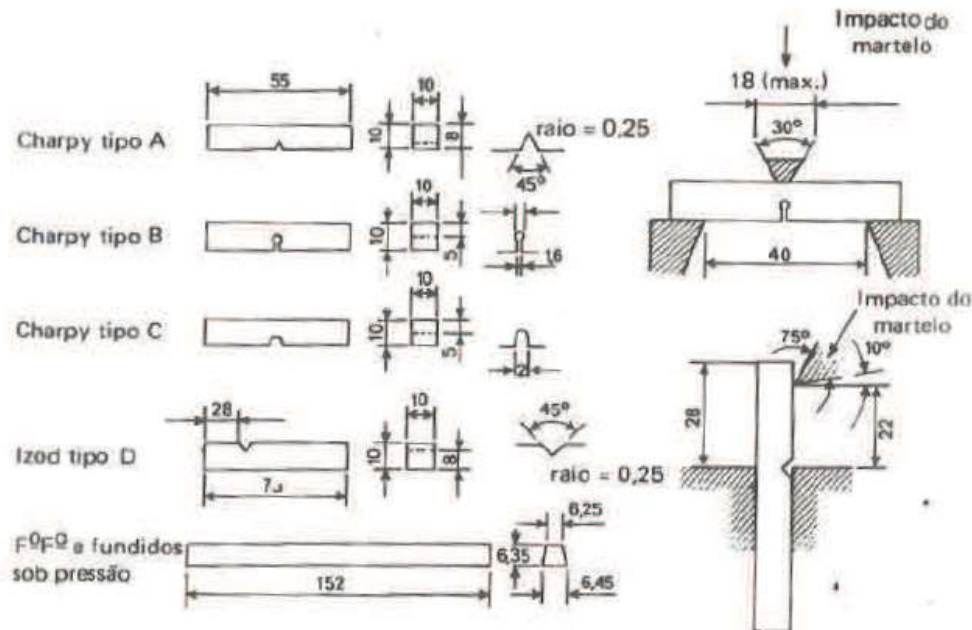
No ensaio de impacto, o choque representa um esforço de natureza dinâmica, visto que a carga é aplicada repentina e bruscamente. Consiste em medir a quantidade de energia absorvida por uma amostra do material, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido. O método mais comum para ensaiar metais é o do golpe, desferido por um peso em oscilação. A máquina é provida de um martelo pendular. O pêndulo é levado a uma certa posição, onde adquire uma energia inicial. Ao cair, ele encontra no seu percurso o corpo de prova, que se rompe. A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia final.

### **3.6.1. Ensaio de impacto em corpos de prova entalhados**

Segundo SOUZA (1982), geralmente os corpos de prova entalhados para ensaio de impacto são de suas classes: corpo de prova Charpy e corpo de prova Izod, recomendados pela norma americana E-23 da ASTM. Os corpos de prova Charpy podem ainda ser divididos em três tipos, como mostrado na Figura 9, conforme a forma de seu entalhe. Assim, os corpos de prova Charpy do tipo A apresentam entalhe mais agudos e são, em geral, usados para mostrar diferenças de energias absorvidas nos ensaios de metais de caráter mais dúctil ou com velocidades menores de ensaios.

Desta forma, a tendência de um metal de se comportar de uma maneira frágil é medida pelo ensaio de impacto. Ou seja, o corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão por impacto, produzida por um martelo pendular. Consequentemente, a energia que o corpo de prova absorve, para se deformar e romper, é medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo. Vale ressaltar que, nas máquinas em geral, essa energia é medida na própria máquina através de um ponteiro que corre numa escala graduada, já convertida em unidade de energia.

**Figura 9** – Corpos de Prova para Ensaio de Impacto.



**Fonte:** Souza, (1982).

Deste modo, pela medida da área de secção entalhada do corpo de prova, pode-se então obter a energia absorvida por unidade de área, que também é útil. Assim, quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material aquela sollicitação dinâmica. As diferentes formas de entalhe são necessárias para assegurar que haja ruptura do corpo de prova, mesmo nos materiais mais dúcteis.

Neste contexto, é importante esclarecer que o entalhe produz um estado triplo de tensões, suficiente para provocar uma ruptura de caráter frágil. No entanto, não se pode medir satisfatoriamente os componentes das tensões existente, pois podem mesmo variar conforme o metal usado ou conforme a estrutura interna a que o metal apresente. Desse modo, o ensaio de impacto em corpos de prova entalhados tem limitada significação e interpretação, sendo útil apenas para comparação de materiais ensaiados nas mesmas condições (CALLISTER, 2000).

### 3.7. TENACIDADE AO IMPACTO

Existe dois modos de fratura que podem ocorrer nos materiais: frágil e dúctil. A classificação está baseada na habilidade de um material em deformar-se plasticamente. As fraturas frágeis são caracterizadas por seu aspecto cristalino, e ocorrem com baixa absorção de energia, sendo característica de materiais de baixa tenacidade. Já as fraturas dúcteis possuem

superfície fibrosa, conseqüente da alta absorção de energia durante o impacto, e é característica de materiais que possuem alta tenacidade.

Segundo PANDOLFO (2009), em aplicações indústrias que esforço brusco é comum, deve-se utilizar materiais que tenham capacidade de absorver a energia desse esforço e dissipá-lo sem permitir a ruptura do material, ou seja, deve-se utilizar materiais que apresentem tenacidade. Como esta propriedade está relacionada com a fase plástica dos materiais, utilizam-se aços e ligas dúcteis neste tipo de aplicação.

Porém, mesmo utilizando aços e ligas dúcteis, que teoricamente possuem resistência suficiente para suportar esforços bruscos, foi verificado na prática que um material dúctil pode romper-se de maneira frágil.

Um material dúctil pode romper-se sem que ocorra uma deformação plástica apreciável – de maneira frágil, portanto – quando as seguintes condições se fizerem presente: velocidade da aplicação da carga suficientemente alta, trinca ou entalhe no material e temperatura do material suficientemente baixa. Esses fatores não precisam atuar simultaneamente para provocar a ruptura frágil (PANDOLFO, 2009).

Alguns materiais são mais afetados pela velocidade alta do choque, apresentando uma sensibilidade que é chamada sensibilidade à velocidade.

Uma trinca promove concentração de tensões muito elevadas, o que faz com que a maior parte da energia produzida pela ação do golpe seja concentrada numa região localizada da peça, com a conseqüente formação da fratura frágil. A existência de uma trinca, por menor que seja, muda substancialmente o comportamento do material dúctil. Esta característica do material dúctil, de comportar-se como frágil devido à trinca, é frequentemente chamada de sensibilidade ao entalhe (PANDOLFO, 2009).

A temperatura tem um efeito muito acentuado na resistência dos metais ao choque, ao contrário do que ocorre na resistência estática. A energia absorvida por um corpo de prova varia sensivelmente com a temperatura do ensaio. Um corpo de prova a uma temperatura mais elevada pode absorver muito mais energia do que se estivesse a uma temperatura inferior.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. MATERIAL

Este trabalho parte da reciclagem dos lacres das latas para acondicionamento de bebidas. Com a quantidade suficiente de lacre reciclado, obteve-se a liga Al-Mg solidificada na forma de lingote através do método de fundição *squeeze casting*. Ao todo foram necessários dois lingotes para as análises e ensaios experimentais.

**Figura 10:** a) e b) Coleta dos lacres. c) Lingotes.

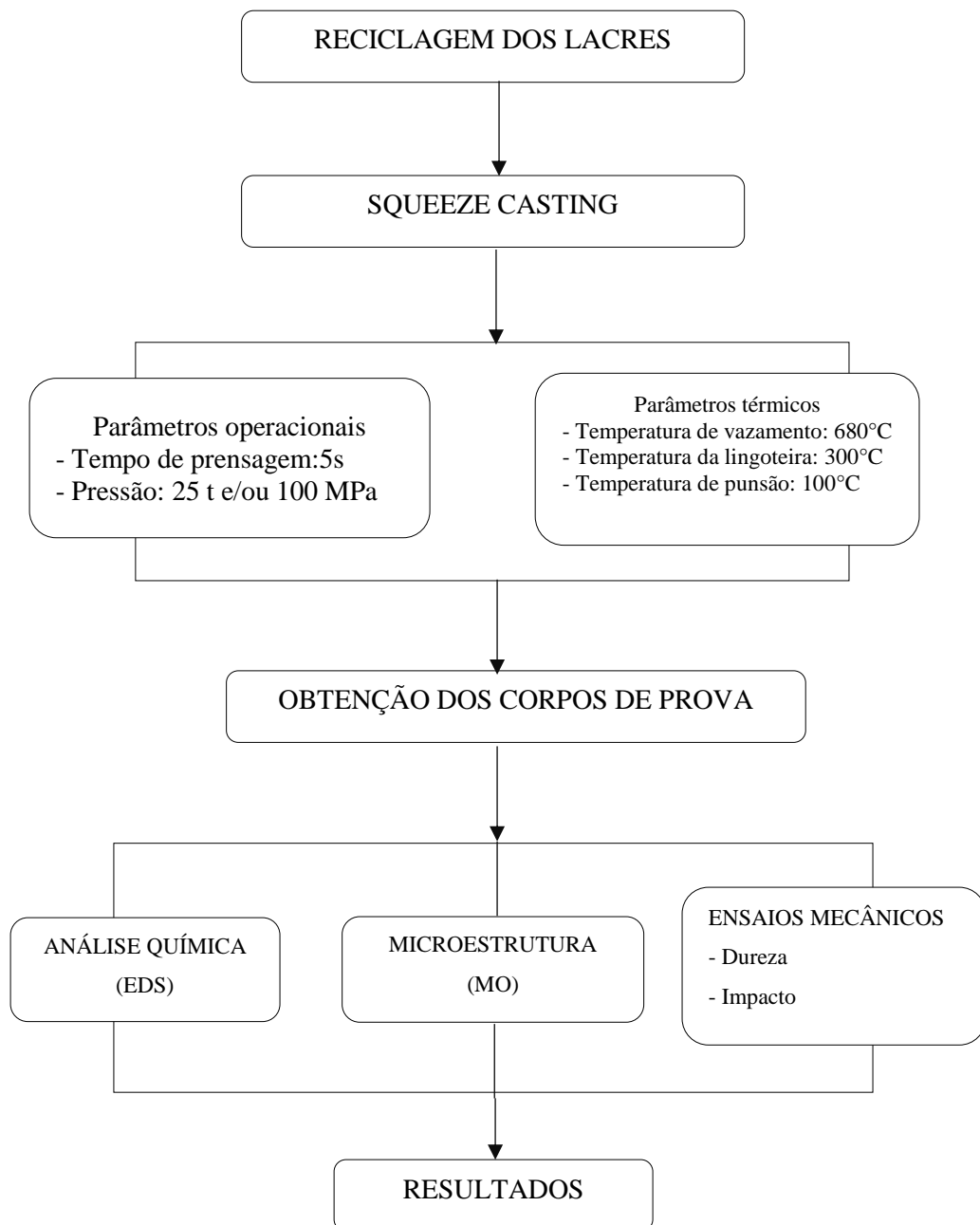


Fonte: Autor, (2017).

## 4.2. MÉTODOS

A Figura 11 ilustra o fluxograma geral da metodologia utilizada para a realização deste trabalho experimental.

**Figura 11:** Fluxograma do Procedimento Experimental.

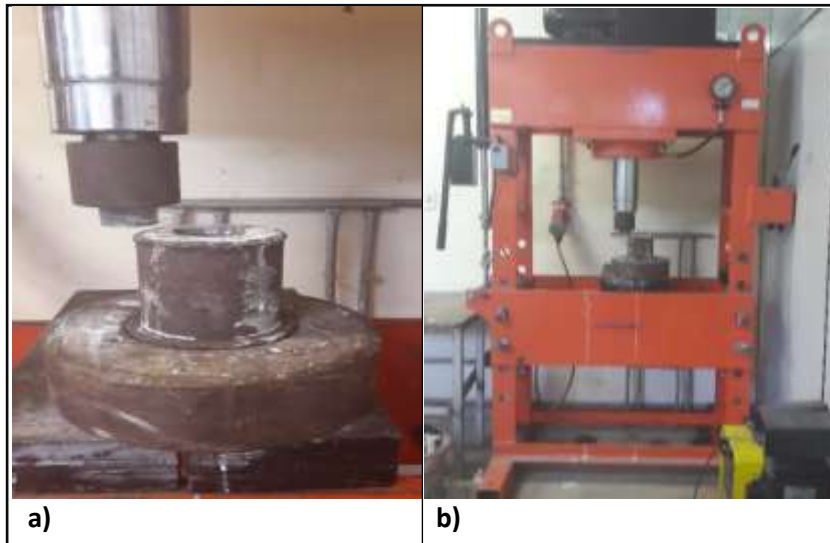


**Fonte:** Autor, (2017).

### 4.3. SQUEEZE CASTING

Para a realização do *squeeze casting* utilizou-se uma lingoteira de aço ASTM 1045 como mostrado na Figura 12 (a) e prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas semi-automático da marca HIDRAUMAX como mostra a Figura 12 (b).

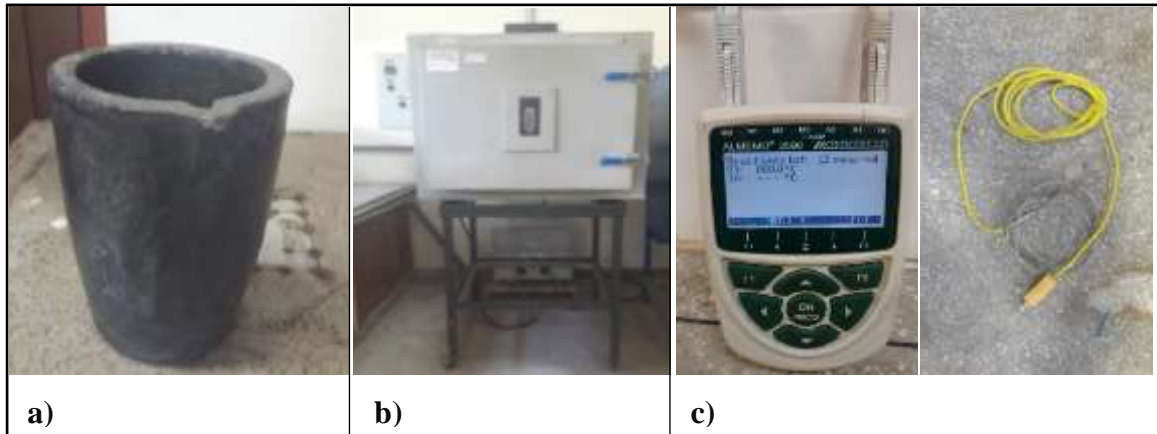
**Figura 12:** a) lingoteira de aço ASTM 1045; b) prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas semi-automático da marca HIDRAUMAX



**Fonte:** Autor, (2017).

Inicialmente para a obtenção dos lingotes foi fundido os lacres em um cadinho de carbetto de silício mostrado na Figura 13 (a), a uma temperatura de 800°C, no forno elétrico, figura 13 (b). Depois de determinados intervalos de tempo retirava-se o cadinho do forno para remoção da escória e adição de mais lacres até atingir o volume adequado para realizar o *squeeze casting*. Foi utilizado um termopar, como mostrado na Figura 13 (c), para controle da temperatura do forno e monitoramento da temperatura de vazamento.

**Figura 13:** (a) Cadinho de carbetto de silício. (b) Forno Elétrico. (c) Termopar.



Fonte: Autor, (2017).

Foi determinado os parâmetros operacionais e térmicos a serem controlados durante a execução dos experimentos.

· Parâmetros térmicos:

- Temperatura da lingoteira = 300 °C
- Temperatura do punção = 100 °C
- Temperatura de vazamento do metal = 680 °C

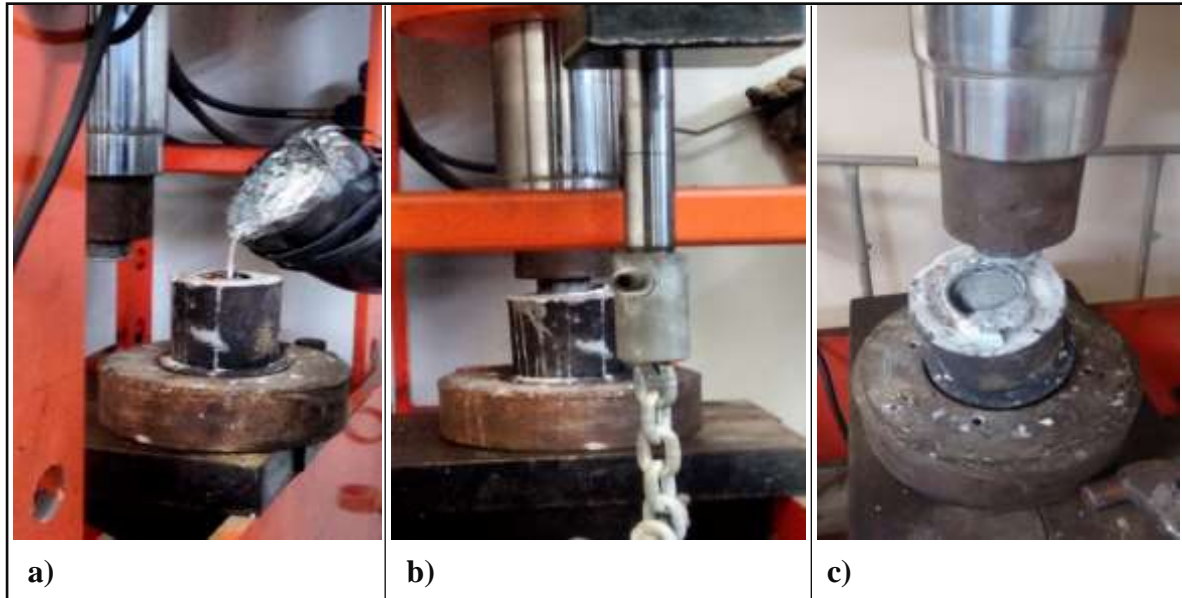
· Parâmetros operacionais:

- Tempo de prensagem aplicado logo após o vazamento do metal na lingoteira = 5s
- Pressões de trabalho = 25 toneladas (100 MPa)

Após atingir a temperatura de vazamento corresponde a 680°C o metal líquido foi vazado no interior da lingoteira já pré-aquecida a uma temperatura de 300°C, posicionada sob a prensa hidráulica, como mostra a Figura 14 (a), para o punção adotou-se 100°C de temperatura. Aplica-se a pressão (Figura 14 b) durante o tempo pré-determinado. O tempo de pressão aplicado logo a após o vazamento do metal foi de 5 s. Para exercer a pressão necessária ao processo utilizou-se uma prensa hidráulica HIDRAUMAX PEH 100 com capacidade máxima de 100 toneladas, aplicando-se aos lingotes a pressão de 25 toneladas (100 MPa). Posteriormente é cessada a pressurização e retira-se o lingote já solidificado da lingoteira, como mostrado na Figura 14 (c).



**Figura 14:** (a) Metal líquido sendo vazado no interior da lingoteira já pré-aquecida a uma temperatura de 300°C. (b) Aplicação da pressão com o punção sob o metal líquido na lingoteira. (c) Lingote já solidificado.



Fonte: Autor, (2017).

Finalmente, os lingotes foram preparados para determinação da: macroestruturas, microestruturas e propriedades mecânicas (Impacto e dureza) e análise fractográfica.

#### 4.4. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Inicialmente os lingotes solidificados foram seccionados em quatro partes para facilitar a confecção dos corpos de prova como mostrado na Figura 15. Os corpos de prova foram usinados seguindo as especificações das normas específicas de cada ensaio.

**Figura 15:** Lingote seccionado para confecção dos corpos de prova.



**Fonte:** Autor, (2017).

#### **4.4.1. Análise macroestrutural, micro estrutural e química**

A utilização das técnicas microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, análise de raios x por energia dispersiva EDS possibilitou a caracterização microestrutural e química da liga Al-Mg, utilizada para fabricação dos lacres das latas para acondicionamento de bebidas.

A amostra (Figura 16) destinada as análises macro e microestrutural foi polida. Utilizou-se lixas d'água de granulação de 100, 200, 320, 400, 600, 800 e 1200 mesh, polidas em politriz gotejada com Pasta de Diamante para Polimento- 6 Microns. A macroestrutura foi revelada com ataque do reagente químico Vilella (5ml HCl + 2gr Ácido Pícrico + 100ml Álcool Etílico).

**Figura 16:** Amostra para metalografia e dureza da liga Al-Mg.



**Fonte:** Autor, (2017).

Na análise micro estrutural, a amostra retirada do lingote foi polida para então ser levada ao microscópio ótico, marca OLYMPUS BX 51 com interface à um computador, este utilizando uma placa de vídeo do tipo WIA/S3G. Em seguida as imagens foram capturadas e analisadas através do Software MOTIC IMAGE PLUS 2.0ML.

**Figura 17:** Microscópio ótico, marca OLYMPUS BX 51.



**Fonte:** Autor, (2017).

Um EDS (Energy Dispersive X – ray Spectrometry) Modelo SwiftED3000 acoplado a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Modelo HITACHI TM 3000 e aceleração de voltagem de 15KV, foi utilizado para análise da composição química qualitativa de cada amostra (Figura 18).

**Figura 18:** Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Modelo HITACHI TM 3000 e aceleração de voltagem de 15KV com EDS (Energy Dispersive X – ray Spectrometry) Modelo SwiftED3000 acoplado.



**Fonte:** Autor, (2017).

#### 4.5. ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado em cada corpo de prova após ser realizado o ensaio de impacto a fim de fazer uma relação entre a energia absorvida e a dureza para cada corpo de prova.

Nesse ensaio foi utilizada uma carga de 60 kgf.

As medições foram feitas com o durômetro de bancada PANTEC, com dispositivo de impacto, Figura 19.

**Figura 19:** Durômetro de bancada PANTEC.

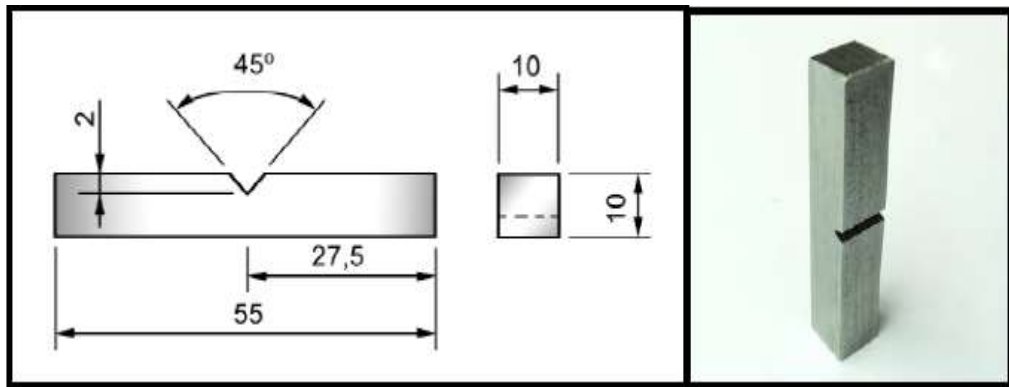


**Fonte:** Autor, (2017).

##### 4.5.1. Análise de resistência ao impacto

O ensaio de impacto realizado foi o de Charpy. Na análise de resistência ao impacto, optou-se em utilizar o corpo de prova Charpy tipo A. As dimensões apropriadas para o ensaio de impacto são definidas pela norma internacional **ASTM E23 - 94** e nacional **ABNT NBR ISO 148 - 2**. As amostras foram confeccionadas a partir do lingote seccionado, no qual foram usinados 10 corpos de prova que possuíam uma secção quadrada de 10 mm de lado e um comprimento de 55 mm, sendo que entalhe foi feito no meio do corpo de prova. A Figura 20 ilustra as dimensões e formato do corpo de prova e a Figura 21 mostra os corpos de prova já usinados.

**Figura 20:** Dimensões dos corpos de prova Charpy tipo A e esquema do corpo de prova.



**Fonte:** Amoury Neto, (2014).

**Figura 21:** Corpos de prova para ensaio de impacto.



**Fonte:** Autor, (2017).

A máquina de ensaio (Figura 22) utilizada foi uma máquina de impacto modelo JB-300B, fabricada pela empresa JINAN SHIDAI SHIJIN INSTRUMENT CO., LTD, utilizando o SMAL PENDULUN com capacidade de medição de até 150 J, variação de 1 J de resolução e 40 mm nos apoios de fixação dos corpos de prova.

**Figura 22:** Máquina de ensaio utilizada.



**Fonte:** Autor, (2017).

O corpo de prova recebeu uma carga aplicada pelo impacto de um martelo pendular, o corpo de prova foi apoiado nas duas extremidades e posicionado horizontalmente.

O martelo é posicionado em uma altura  $H$  (usar corpo de prova como referência), ao ser acionado, o martelo choca-se com a face oposta ao entalhe e continua o seu trajeto até uma altura  $h$  (altura menor que a de partida). Ao obter a altura “ $h$ ” (menor altura), o equipamento de ensaio de impacto já calcula a quantidade resultante de energia absorvida pelo corpo de prova no ato do impacto.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os resultados – análise química, macro grafia, micrografia, dureza e ensaio de impacto – obtidos através dos ensaios explicado na seção anterior estão expostos e discutidos a seguir.

### 5.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL

A análise macro gráfica permitiu analisar os grãos resultantes da solidificação e identificar os defeitos de fundição presentes nos lingotes solidificados por squeeze casting.

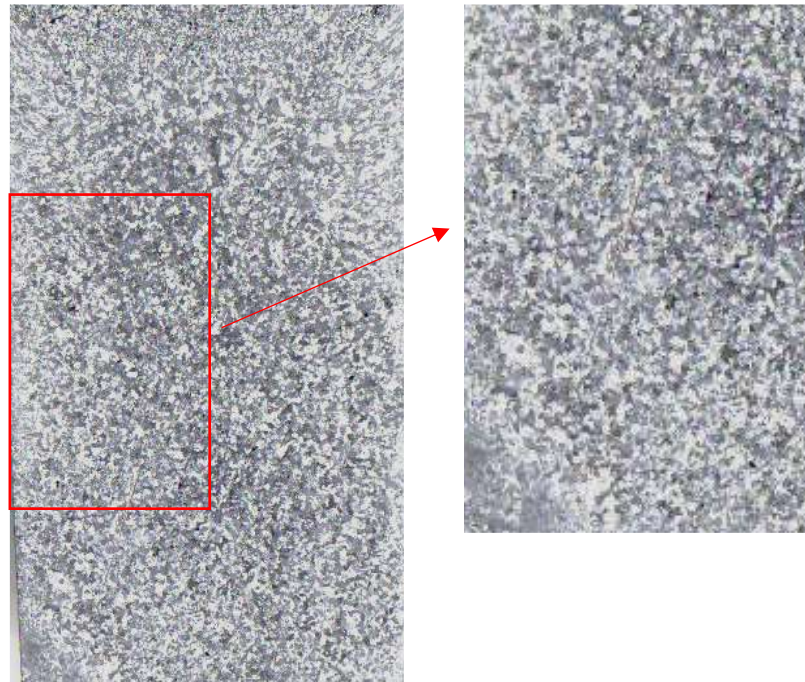
A Figuras 23 mostra a macroestrututra obtida para a liga Al-Mg, observa-se que ocorreu um comportamento predominante de estrutura equiaxial com orientações cristalográficas aleatória, sendo uma região periférica, em contato direto com o molde, formada de grãos equiaxiais de granulometria mais reduzida, e uma região central de grãos de tamanho maior aos encontrados na periferia.

E em relação aos defeitos de fundição, verifica-se que a utilização de uma pressão de 100 MPa no processo obtém-se uma macroestrutura que apresenta “sound casting” – peça sem defeito de fundição.

Portanto, a aplicação da pressão de 100 MPa na solidificação da liga Al-4%Mg resultou em uma macroestrutura contendo uma combinação de uma estrutura completamente equiaxial, com grãos mais grosseiros na base e grãos mais refinados na parte superior do lingote, e sound casting (peça sem defeito de fundição).



**Figura 23:** Macroestrutura de solidificação da liga Al-Mg com estrutura 100% equiaxial.



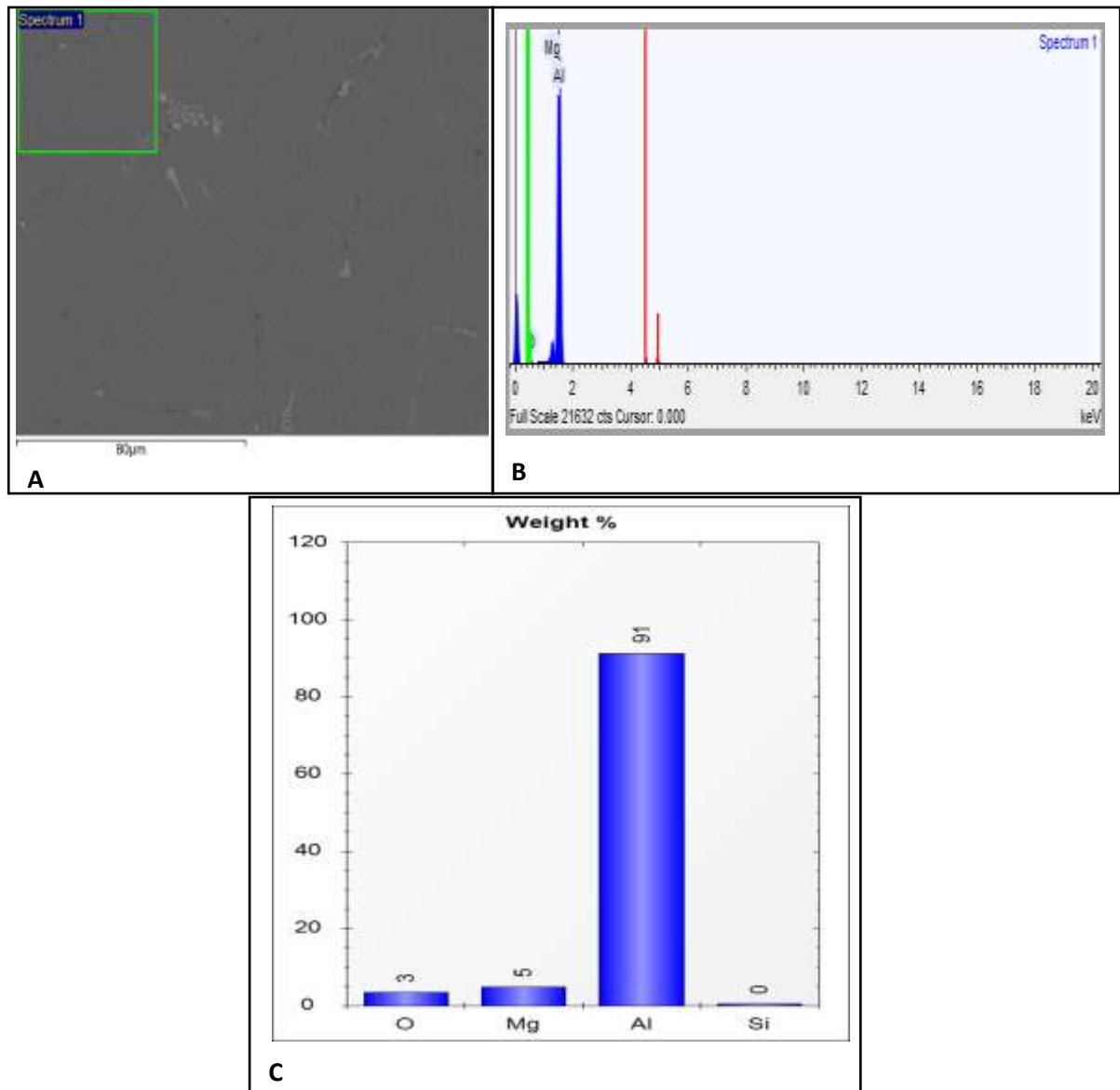
**Fonte:** Autor, (2017).

## 5.2. ANÁLISE QUÍMICA

Para análise dos principais elementos químicos presentes na liga foi realizado um mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) na amostra retirada do lingote.

A análise química é resultante da média das variações percentuais dos 10 (dez) espectros realizados na amostra.

As Figuras 24, 25, 26 e 27 a seguir apresentam quatro espectros dos dez realizados na amostra.

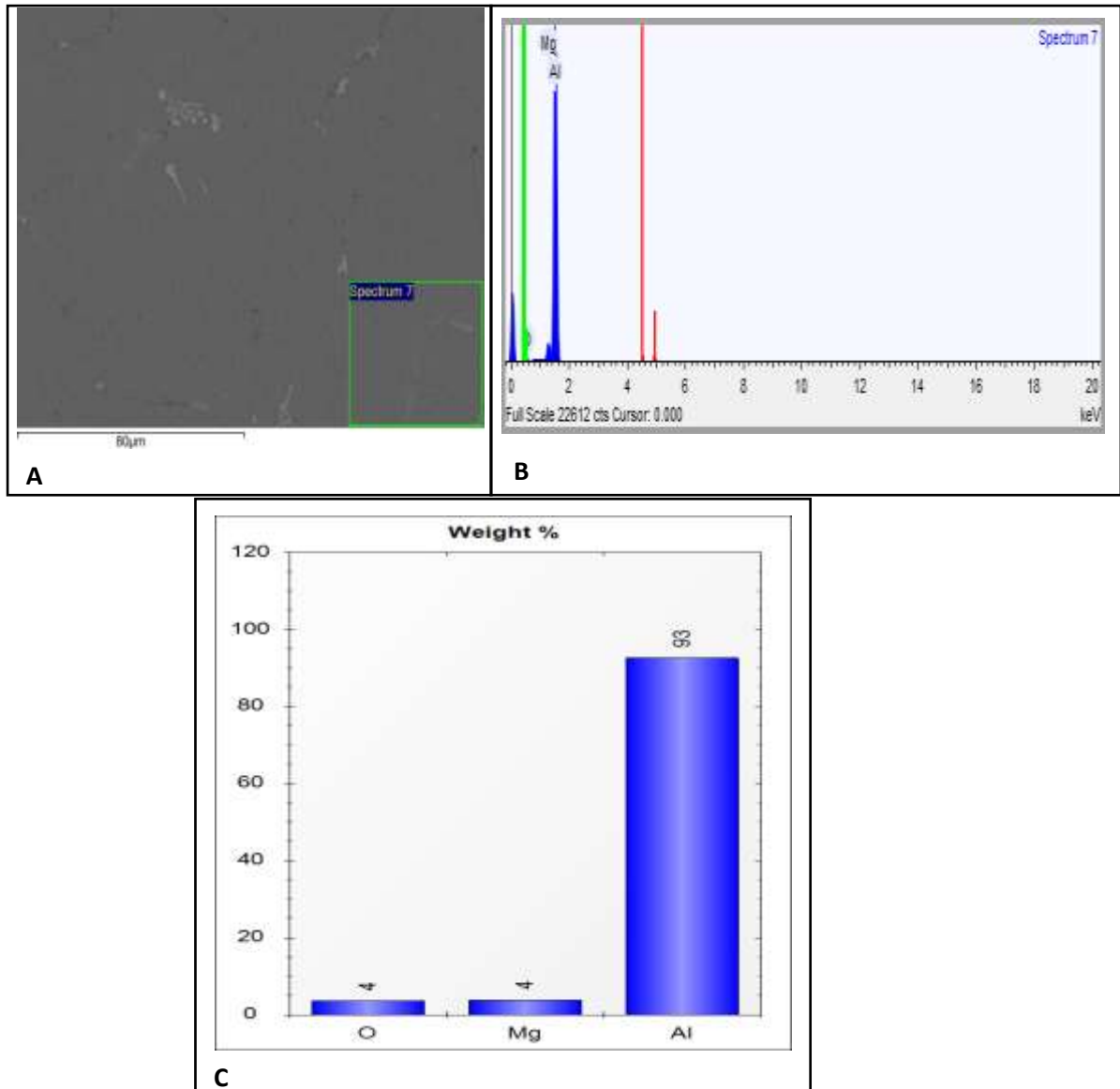
**Figura 24:** EDS da primeira área analisada da amostra.

**Fonte:** Autor, (2017).

**A** – MEV da superfície.

**B** – Espectrômetro de EDS para a área analisada.

**C** – Análise química da liga.

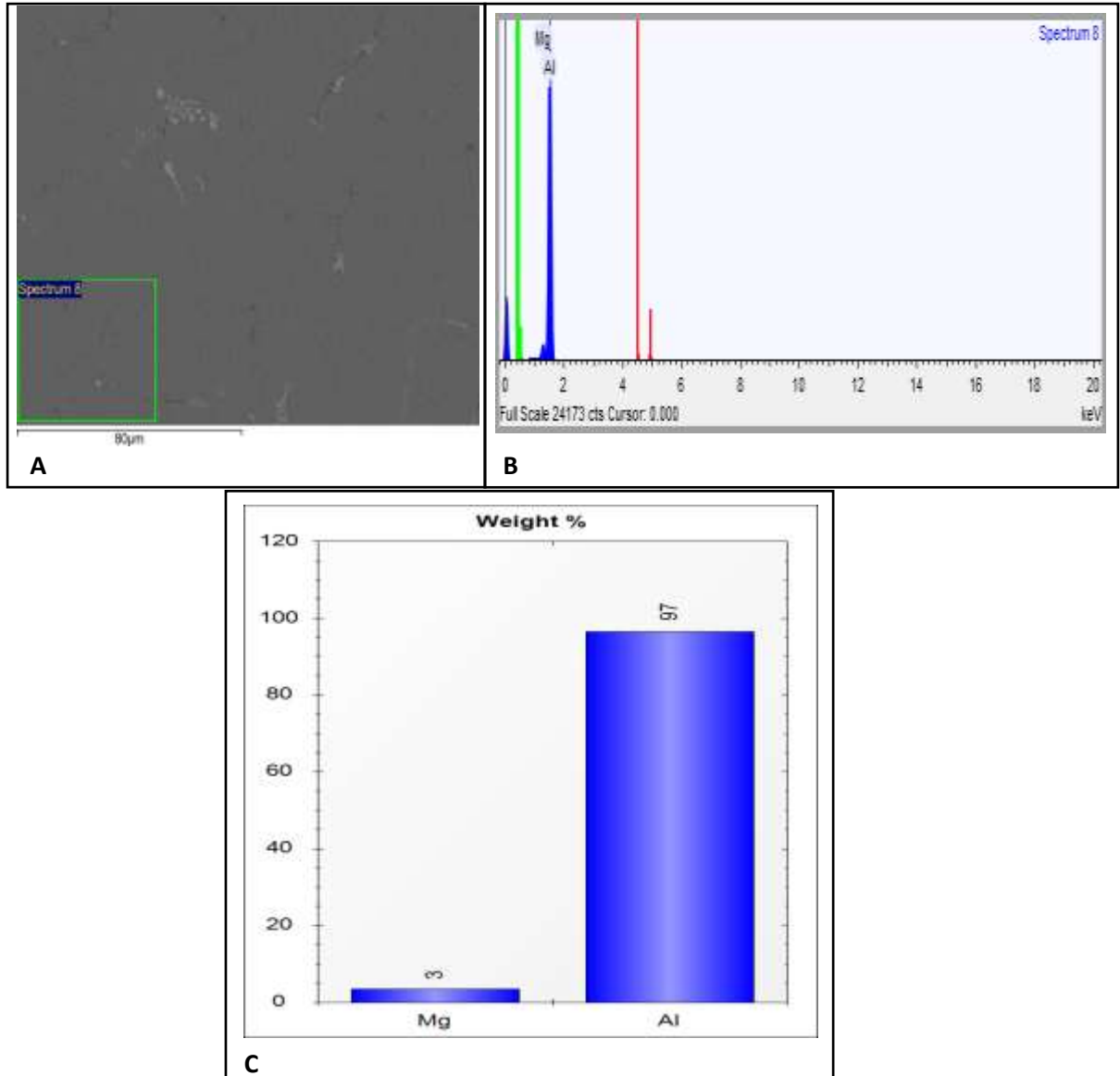
**Figura 25:** EDS da sétima área analisada da amostra.

**Fonte:** Autor, (2017).

**A** – MEV da superfície.

**B** – Espectro de EDS para a área analisada.

**C** – Análise química da liga.

**Figura 26:** EDS da oitava área analisada da amostra.

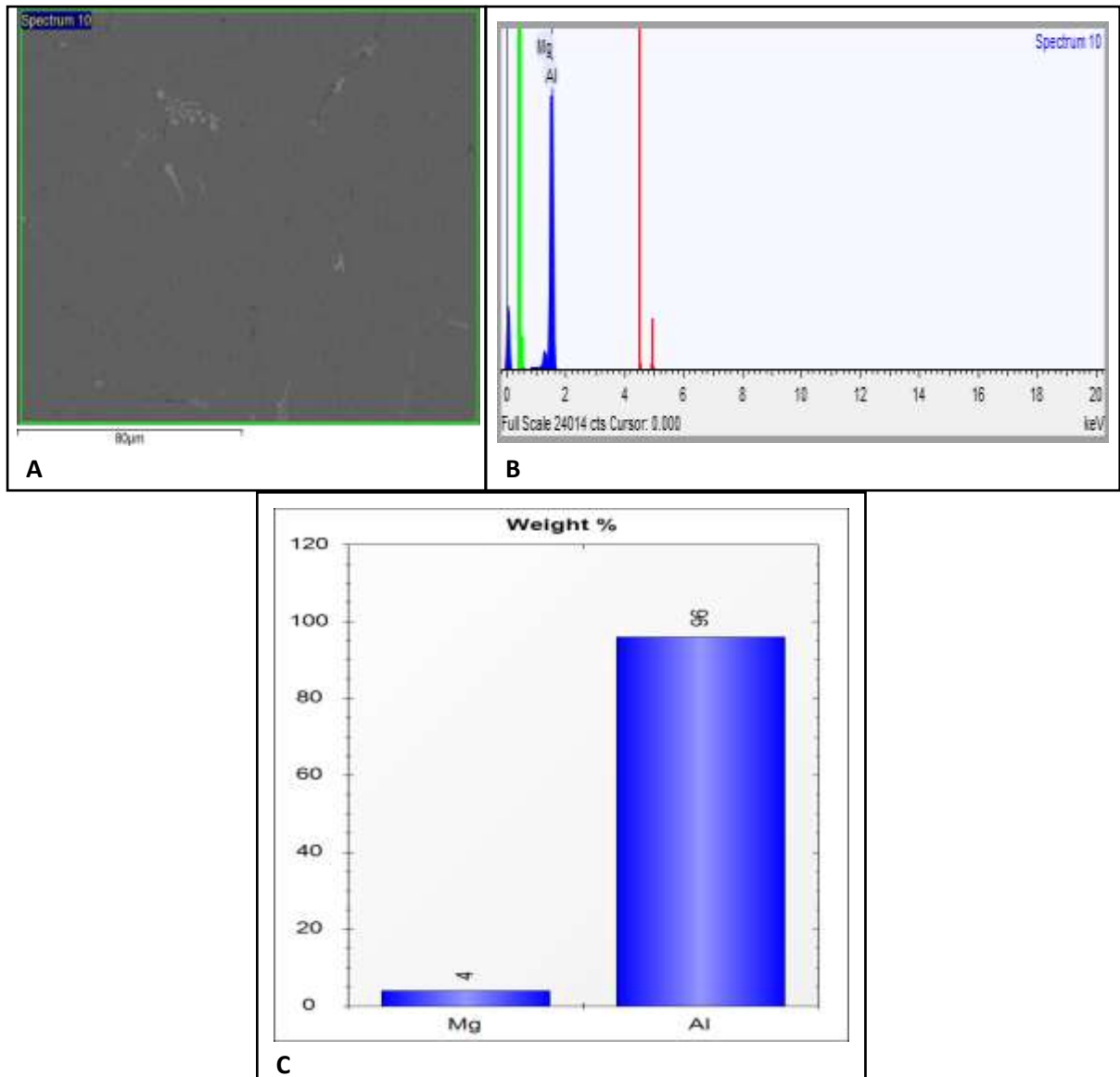
**Fonte:** Autor, (2017).

**A** – MEV da superfície.

**B** – Espectro de EDS para a área analisada.

**C** – Análise química da liga.

**Figura 27:** EDS da décima área analisada da amostra.



**Fonte:** Autor, (2017).

**A** – MEV da superfície.

**B** – Espectro de EDS para a área analisada.

**C** – Análise química da liga.

A Tabela 2 indica os valores da análise química dos dez espectros realizados. Assim como a média e desvios padrão dos valores obtidos.

**Tabela 2:** Análise química dos dez espectros realizados.

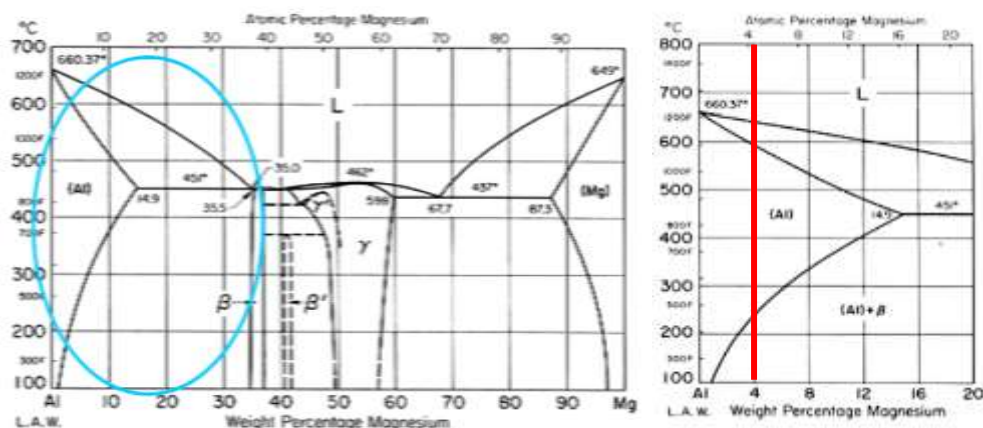
| Nome                 | O     | Mg            | Al            | Si    |
|----------------------|-------|---------------|---------------|-------|
| Espectro 1           | 3.447 | 4.892         | 91.243        | 0.418 |
| Espectro 2           |       | 3.867         | 96.133        |       |
| Espectro 3           | 3.622 | 3.630         | 92.748        |       |
| Espectro 4           |       | 3.598         | 96.402        |       |
| Espectro 5           |       | 3.630         | 96.370        |       |
| Espectro 6           |       | 3.760         | 96.240        |       |
| Espectro 7           | 3.587 | 3.875         | 92.539        |       |
| Espectro 8           |       | 3.468         | 96.532        |       |
| Espectro 9           |       | 3.197         | 96.803        |       |
| Espectro 10          |       | 4.047         | 95.953        |       |
| <b>Média</b>         |       | <b>3.796</b>  | <b>95.096</b> |       |
| <b>Desvio Padrão</b> |       | <b>0,4518</b> | <b>2,0634</b> |       |

**Fonte:** Autor, (2017).

A partir da análise química foi possível obter os elementos químicos presentes na liga. Nota-se através do valor da média que se trata de uma liga bifásica Al-4%Mg hipoeutética do sistema binário Al-Mg, como pode ser observado na Figura 28.

A presença de Oxigênio e Silício é devido a elementos exógenos que podem ser associados ao uso do coque como desmoldante no caso do O e em relação ao Si estaria relacionado ao uso de cadinhos de Carbetto de Silício.

Figura 28: Diagrama de fases Al-Mg.

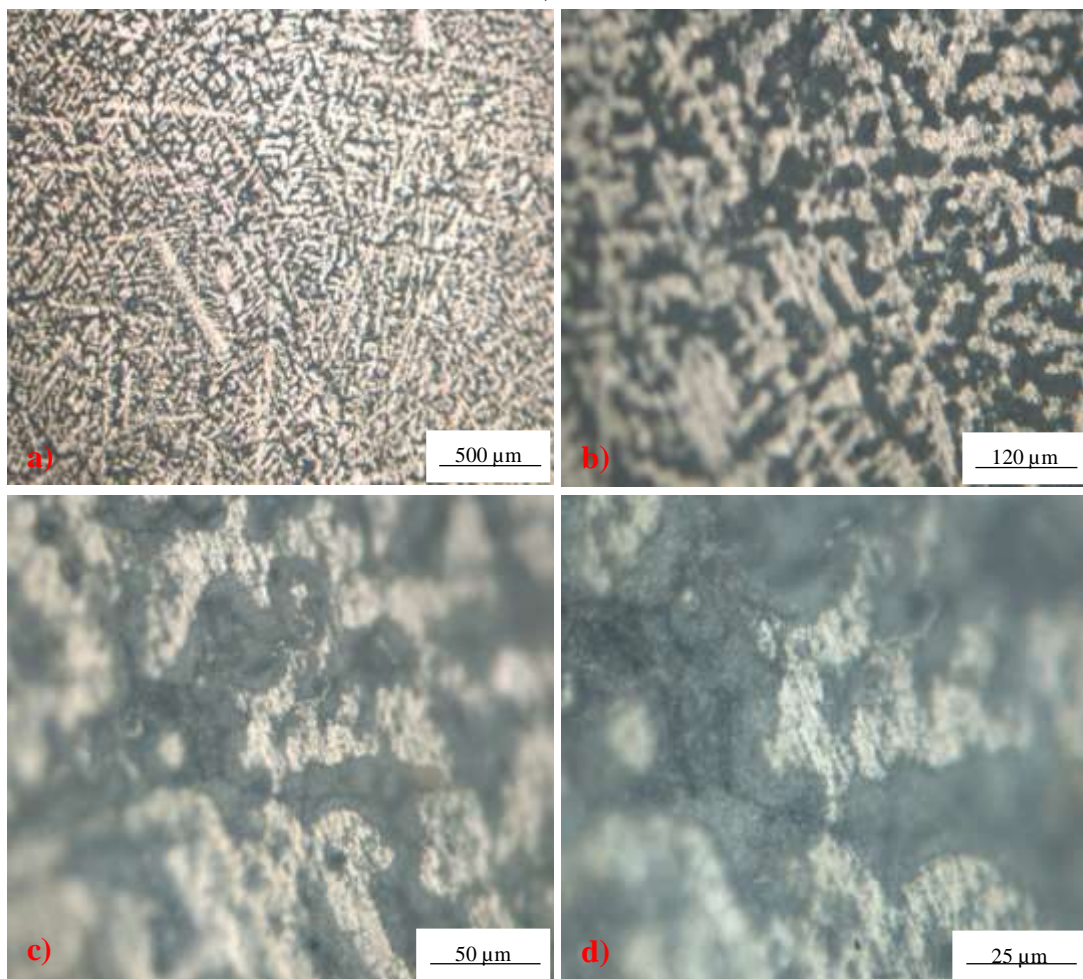


**Fonte:** Alumínio e suas ligas, (2013).

### 5.3. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 29 a), b), c) e d) apresenta as microestruturas obtidas para a liga Al-Mg. Observa-se que a utilização da pressão de 100 MPa permitiu a obtenção de uma microestrutura sem defeitos de fundição (*sound casting*) – assim como o resultado apresentado na análise macroestrutural – tais como porosidade, defeitos de Shrinkage e macrossegregação que são influenciados pelos parâmetros operacionais, como a pressão de trabalho.

**Figura 29:** Microestrutura da liga Al-4%Mg: a) Aumento 50X; b) Aumento 200X; c) Aumento 500X; d) Aumento 1000 X.



**Fonte:** Autor, (2017).

É possível constatar através das imagens acima, que houve a presença de dendritas, como esperado, visto que a estrutura típica de um material fundido é a presença de dendritas. Mas não houve predominância dessa microestrutura, pois, de acordo com SKOLIANOS et., al (1997), em geral as dendritas e o espaçamento interdendrítico de peças fundidas sob compressão são menores que aqueles de peças fundidas na ausência de pressão.

#### 5.4. DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado nos corpos de prova de impacto, foi realizado 10 indentações em cada um deles, como exemplo mostrado na Figura 30.

Na tabela 3 é indicado os valores obtidos no ensaio de dureza Rockwell F (HRF) realizado, assim como a transformação para valores de dureza Brinell (HB). Essa transformação foi realizada a fim de realizar comparação com outros resultados de dureza HB para ligas Al-Mg encontrados na literatura, visto que não foi encontrado para HRF.

**Figura 30:** Amostra logo após a realização do ensaio de dureza.



**Fonte:** Autor, (2017).



**Tabela 3:** Ensaio de dureza Rockwell F (HRF) realizado, e transformação para valores de dureza Brinell (HB).

| Medições             | Dureza       |             |
|----------------------|--------------|-------------|
|                      | HRF          | HB          |
| 1                    | 61,5         | 56          |
| 2                    | 60,4         | 55          |
| 3                    | 61,8         | 56          |
| 4                    | 61,7         | 56          |
| 5                    | 59,6         | 55          |
| 6                    | 62,6         | 57          |
| 7                    | 61,5         | 56          |
| 8                    | 60,5         | 54          |
| 9                    | 65           | 59          |
| 10                   | 57,3         | 53          |
| <b>Média</b>         | <b>61,19</b> | <b>55,7</b> |
| <b>Desvio padrão</b> | <b>2,00</b>  | <b>1,64</b> |

Fonte: Autor, (2017).

É possível fazer uma análise da dureza obtida através de uma analogia entre a liga Al-Mg deste trabalho e as ligas Al-Mg que são utilizadas para a fabricação de tampas para latas de bebidas.

Segundo Pickering (1997), as ligas 5042, 5352, 5082 e 5182 são usadas na fabricação de tampas para latas de bebidas, sendo as ligas 5082 e 5182 as mais frequentemente utilizadas. Dentre essas ligas, e com base na composição química, a liga que mais se aproxima é a 5082, visto que possui uma composição química Al-4,5%Mg (INFOMET, 2017).

Essa liga depois de submetida a endurecimento através de trabalho à frio (encruamento) possui dureza em torno de 100 HB (ALUMINIO E SUAS LIGAS, 2013).

Portanto, observa-se pelo resultado da média da dureza HB, que o *squeeze casting* não influenciou para um aumento significativo da dureza da liga, visto que através do processo obteve-se um grau de endurecimento bem inferior aquele obtido por trabalho à frio.

### 5.5. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

O ensaio de impacto foi realizado a temperatura ambiente sendo determinada à energia absorvida em cada impacto para 10 corpos de prova. Os resultados são mostrados na Tabela a seguir.

**Tabela 4:** Resultado do ensaio de impacto (Energia Absorvida – Joule (J)).

| <b>CP</b>            | <b>Energia absorvida<br/>(J)</b> |
|----------------------|----------------------------------|
| 1                    | 14,5                             |
| 2                    | 16                               |
| 3                    | 15                               |
| 4                    | 15                               |
| 5                    | 16,5                             |
| 6                    | 13,5                             |
| 7                    | 14,5                             |
| 8                    | 17                               |
| 9                    | 12                               |
| 10                   | 20                               |
| <b>Média</b>         | <b>15,4</b>                      |
| <b>Desvio Padrão</b> | <b>2,17</b>                      |

**Fonte:** Autor, (2017).

O valor médio da energia absorvida é justificado através da análise fractográfica da fratura. A Figura 31 mostra as direções de fratura resultantes nos corpos de prova. Na Figura 32 é possível fazer uma análise da superfície da fratura dos corpos de prova de maiores, intermediários e baixos valores de energia absorvida, a fractográfica foi realizada com o auxílio de uma lupa, e teve um aumento de 80x. Através da imagem observa-se que a superfície de fratura da Figura 32 a) e b) predominam os alvéolos de fratura dúctil, sem mecanismo intergranular. A Figura 32 c) e d) apresenta também característica dúctil, mas é possível observar o mecanismo intergranular em algumas regiões.

A característica dúctil pode ser atribuída a macroestrutura que apresentou ‘sound casting’, principalmente devido a não presença de poros que influência na menor tendência à fratura frágil, visto que os poros em geral propiciam a propagação de trincas, ocasionando fraturas frágeis.

Já as Figura 32 e) e f) apresentaram característica de fratura frágil com predominância quase que total de fratura intergranular.

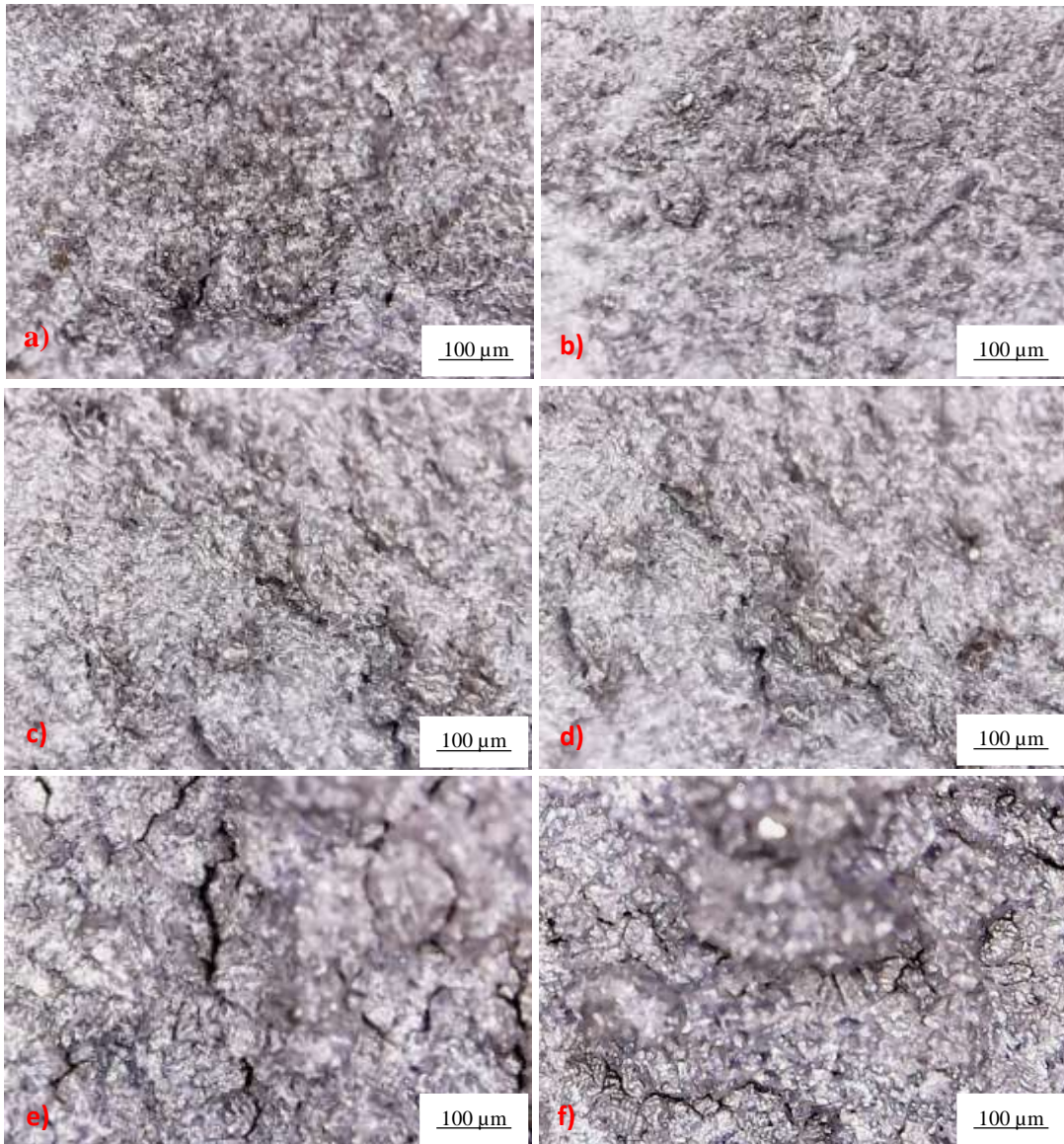
Essa diferença pode ser atribuída a não uniformidade da macroestrutura, visto que apresentou regiões com grão equiaxial mais refinados resultando nos valores de menor energia absorvida devido apresentar maior dureza, assim como as regiões com grãos equiaxiais maiores característicos dos maiores e intermediários valores de energia absorvida.

**Figura 31:** Corpos de prova fraturado.



**Fonte:** Autor, (2017).

**Figura 32:** Face de fratura dos corpos de prova ensaiado ao impacto a temperatura ambiente analisada com auxílio de uma lupa. Aumento de 80X. a) e b) Fractografia dos corpos de prova com maiores valores de energia absorvida. c) e d) Valores intermediários. e) e f) baixos valores.



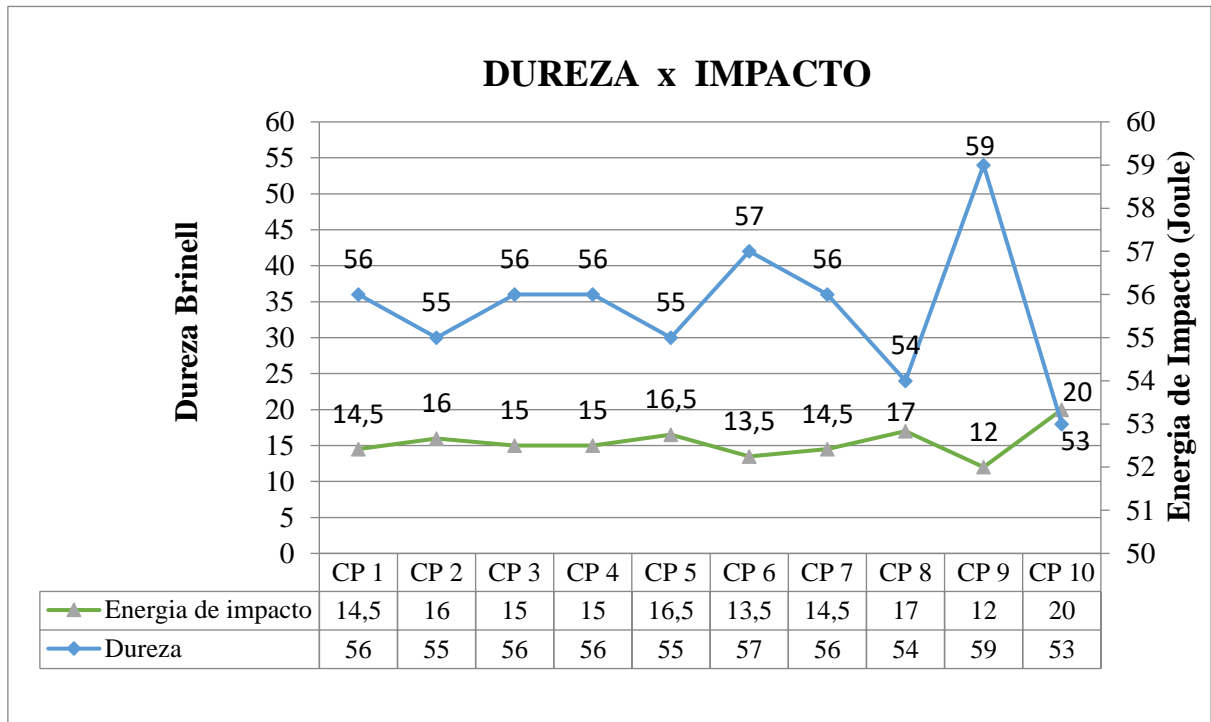
**Fonte:** Autor, (2017).

## 5.6. COMPARATIVO ENTRE DUREZA E TENACIDADE

Com o gráfico de Dureza x Impacto (Figura 33), podemos perceber que são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a dureza, menor a tenacidade. Isso ocorre porque quanto maior é a dureza do material, maior é a fragilidade, com isso, o material rompe facilmente quando submetido ao ensaio de impacto, conseqüentemente menor é a energia absorvida no ensaio.

Portanto através do gráfico observa-se que para corpos de prova com maior energia absorvida menor foi sua dureza, e vice-versa.

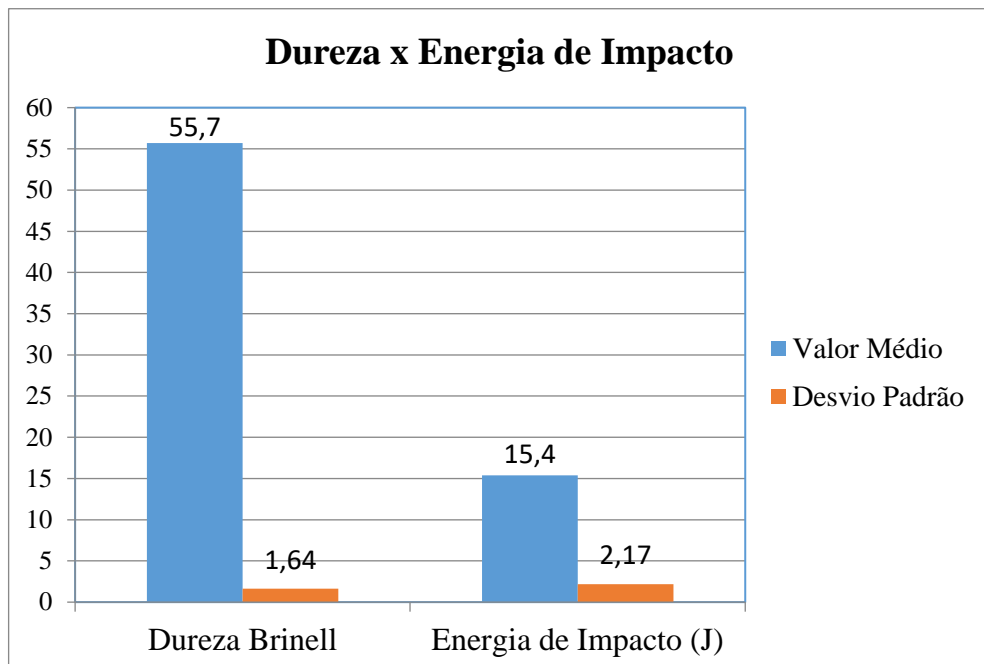
**Figura 33:** Gráfico de Dureza x Impacto.



**Fonte:** Autor, (2017).

O gráfico da Figura 34 traz um comparativo do valor médio e desvio padrão dos resultados de dureza HB e Energia de Impacto, evidenciando a variabilidade dos valores através do resultado de desvio padrão.

**Figura 34:** Gráfico do comparativo do valor médio e desvio padrão dos resultados de dureza HB e Energia de Impacto.



**Fonte:** Autor, (2017).

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos e a correlação entre os parâmetros do processo com os aspectos morfológicos estruturais, assim como a resistência mecânica (Dureza e Impacto) e a Microestrutura da liga estudada permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

### 6.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL

A aplicação de 100 MPa na solidificação da liga resultou na eliminação dos defeitos de fundição, assim como a temperatura da coquilha e do punção que também podem ter influenciado, visto que as temperaturas utilizadas foram suficientes para não gerar o aparecimento de defeitos. Mas a pressão é o parâmetro que exerce maior influência. Isso propiciou um aumento da tenacidade ao impacto da liga Al-Mg, principalmente devido a eliminação de porosidade.

Observou-se também, que a liga apresentou estrutura predominantemente equiaxial com grãos grosseiros no centro e grãos mais refinados na parte superior do lingote. E devido a não uniformidade do tamanho de grão dessa macroestrutura, regiões com grãos mais refinados refletiram em valores de dureza mais elevados, e conseqüente redução na energia de impacto absorvida.

### 6.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Do exame micro gráfico observou-se que também não houve, assim como na macroestrutura, a presença de defeitos de fundição.

Foi possível observar que o *squeeze casting* influencia na redução da presença de dendritas na microestrutura do fundido. Em decorrência do aumento de pressão a velocidade de resfriamento dificulta o crescimento das dendritas.

### 6.3. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO E DUREZA

Observou-se que a eliminação de porosidade e outros defeitos de fundição acaba possibilitando maior absorção de energia, em contrapartida devido a não uniformidade do tamanho de grãos observados na análise macro gráfica, houve uma variabilidade nos valores de energia absorvida dos corpos de prova. Sendo possível constatar que houveram corpos de prova

com menores valores, possivelmente provenientes de regiões com grãos mais refinados o que resultou em um aumento da dureza, e consequente redução da tenacidade, esse fato pode ser observado através do gráfico Dureza x Impacto que reflete a condição inversa entre Dureza e Impacto.

A variabilidade dos resultados é refletida no tipo de fratura observada, houve a predominância de fratura dúctil, mas também foi observado aspecto de fratura frágil nos corpos de prova. Os corpos de provas que apresentaram característica de fratura dúctil foram os que apresentaram maiores valores de energia absorvida, consequentemente os menores valores de dureza. Já os que se mostraram com características de fratura frágil apresentaram os menores valores de energia absorvida, consequentemente os maiores valores de dureza.

O processo *squeeze casting* influenciou na resistência mecânica da liga Al-Mg através da eliminação de defeitos e refinamento de grãos, causado pela maior extração de calor metal/molde em decorrência do melhor contato entre o metal e a lingoteira proporcionados pela alta pressão aplicada. Foi possível observar a relação inversa entre Dureza e Tenacidade ao impacto através dos resultados dos ensaios de resistência mecânica.



## 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Considerando o tema abordado nessa pesquisa e com base nos resultados obtidos nesse trabalho seguem-se, algumas sugestões para trabalho futuro:

1. Adicionar um elemento, como o Zinco ou Silício, na liga Al-Mg dos lacres para acondicionamento de bebidas e estudar a influência dessa adição nas macroestruturas de solidificação para o processo de *squeeze casting*, assim como as propriedades mecânicas.
2. Avaliar a resistência mecânica da liga de alumínio dos lacres para acondicionamento de bebidas obtida pelo método *squeeze casting* através de um levantamento da curva de transição dúctil frágil do material.
3. Estudar a tenacidade ao impacto da liga Al-Mg obtida dos lacres para acondicionamento de bebidas quando obtida através do método *squeeze casting* por utilizando diferentes pressões;
4. Investigar a taxa de resfriamento do processo de fundição *squeeze casting* e suas influencias na densidade da liga Al-Mg.

## 8. REFERÊNCIAS

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos do alumínio e suas aplicações**. São Paulo: ABAL, 2004.

ABRALATAS: Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alta Reciclabilidade. **A História de Sucesso da Lata de Alumínio no Brasil e no Mundo**. Brasília: ABRALATAS, 2004.

ALCOA, **Ligas e Têmperas de Extrusão**. Disponível em: <[https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo\\_ligas\\_temperas\\_2010.pdf](https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf)>. Publicado em 2010, acesso 26 ago. 2016.

ALUMINIO E SUAS LIGAS, Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aluminio%5B1%5D.pdf>>; 2013 [acessado em outubro de 2016].

ANDRADE, R. B. **Análise da formação da microestrutura durante a solidificação de ligas metálicas ferrosas e não ferrosas em moldes com diferentes características**. Disponível em: <[www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)>. Acesso em: 22 Jan. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM–E18 – **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Mettalic Materials**. ASTM, 2005.

American Society for Metals. Metals Handbook, 9º ed. Vol 1. Ohio, 1978.

AMOURY NETO, J. S. **Caracterização mecânica e levantamento da curva jominy do aço sae 1644 produzido em uma siderúrgica local**. Marabá. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, 2014.

ASM Handbook Castings. Ohio: ASM International, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 148 – 2. **Ensaio de impacto por pêndulo Charpy**. ABNT, 2013.

BARBOSA, C., BASTIAN, F., ACSELRAD, O - "**Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Dureza da Liga 6063 (Al-Mg-Si)**", Anais do 46º Congresso Anual da ABM, v.3, Setembro, 1991, p.177-188.

BRANCO, C. **Mecânica dos Materiais. Fundação Calouste Gulbenkian. 5 ed. Lisboa, 2011.**

BUDINSKI, K, **Engineering Materials: Properties & Selection**, Reston Publ.Co., 1979,p.323.

CALLISTER, W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 589p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.

CALLISTER Jr., W. D. **Materiais science and engineering: an introduction**. 3. ed. New York: John Wiley, 1994.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Alumínio e Suas Ligas**. Disponível em: <http://docslide.com.br/documents/smith-cap-aluminio.html>. Acesso em: 26 de ago. 2016.

DIAS, L. A. M. **Estrutura de aços: conceitos, técnicas e linguagem**. 2º ed. São Paulo: Zigurate Editora 1998.

DIETER, G. **Metalurgia Mecânica**, 2ª Edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.

DIOGENES, A. C.; **Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio**. Guaratinguetá. Trabalho de Conclusão de Curso. UNESP, 2011.

DORCIC, J. L.; VERMA, S. K., **Squeeze Casting**, IN.: American Society for metals: ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9ª edition, pp. 323-327, 1988.

DOS SANTOS, Carlos A; SPIM, Jaime A; GARCIA, Amauri. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro, 2008.

FABRICIO, D. A. K.; COSTA, V. M.; MENDES, E. T.; REGULY, A.; STROHAECKER, T. R. **Acreditação do ensaio de impacto charpy: o caso do lamef**. 2014. Disponível em: <[Http://www.resag.org.br/congressoresagenqualab2014/anais/trabalhos/danielantoniokapperfabricio2.pdf](http://www.resag.org.br/congressoresagenqualab2014/anais/trabalhos/danielantoniokapperfabricio2.pdf)>.

FELTRE, R. "**Fundamentos da Química**", Vol. Único, Ed. Moderna, 1997, p. 85.

FERREIRA, J. M. G. de C., **Tecnologia da Fundição**, Fundação Calouste Gulbenkian, pp. 507-518, 1999.

FLEMINGS, M. C.; **Solidification Processing**. New York: McGraw-Hill, 1974.

GARCIA, A.; **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora da Unicamp, 1º ed, p. 117, 2001.

GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. A dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p.

GHOMASHCHI M. R.; VIKHROV A. **Squeeze Casting: na Overview**. Journal of Materials Technology, v. 101, p. 1-9, 2000.

GOULART, P.R. **Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Hipoeutéticas Al-Si**. 2005. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

HU, H., **Squeeze Casting of Magnesium Alloys and their Composites**, J.Mater. Sci. 33, pp. 1579-1589, 1998.

INFOMET. **Ligas Al-Mg**. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=53>. Acessado em: 29 de Janeiro. 2017.

MAGNABOSCO, R. BERGAMO, M. G. V. **Influência da energia de impacto na energia absorvida em ensaio charpy de aços com estrutura ferrita-martensita.** 2015. Disponível em:

<[http://www.researchgate.net/profile/Rodrigo\\_Magnabosco/publication/265938848\\_INFLUNCIA\\_DA\\_ENERGIA\\_DE\\_IMPACTO\\_NA\\_ENERGIA\\_ABSORVIDA\\_EM\\_ENSAIO\\_CHARPY\\_DE\\_AOS\\_COM ESTRUTURA\\_FERRITA\\_MARTENSITA/links/54cf5b930cf24601c0933d84.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Rodrigo_Magnabosco/publication/265938848_INFLUNCIA_DA_ENERGIA_DE_IMPACTO_NA_ENERGIA_ABSORVIDA_EM_ENSAIO_CHARPY_DE_AOS_COM ESTRUTURA_FERRITA_MARTENSITA/links/54cf5b930cf24601c0933d84.pdf)>.

M. Van Lancker, Metallurgy of Aluminum Alloys, John Wiley & Sons, 1967, p.35.

NUNES, Rafael. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials.** ASM Handbook, vol 2, "Casting", 9a edition, p. 48; 640-660, 1990.

OSÓRIO, W. R. **Análise da Influência de Parâmetros Estruturais da Solidificação de Metais e Ligas na Resistência à Corrosão.** 2004. 194f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

OLIVEIRA, T.F.L. OLIVEIRA, J.R. NASCIMENTO Jr.R.C. FILHO, A.I. VIEIRA, E.A.. **Análise Térmica de novas ligas para conformação no estado semi-sólido. 64º Congresso Anual da ABM – Internacional.** 2009. Belo Horizonte, MG.

OSÓRIO, W.R., SANTOS, C.A., QUARESMA, J.M.V., GARCIA, A., **"Mechanical properties as a function of thermal parameters and microstructure for Zn-Al castings"**, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 143-144, pp. 703-709, December, 2003.

PANDOLFO, D. **Estudo da tenacidade ao impacto de um aço SAE 1020 submetido a tratamentos térmicos.** Porto Alegre. Trabalho de Conclusão de Curso. PUCRS, 2009.

PICKERING, E.R. - **"Welding Aluminum"**, *Advanced Materials & Processes*, v.152, 1997, n.4, October, p.29-30.

PERALTA, J. L. et al. **Análise comparativa da formação de macroestruturas em metais não ferrosos considerando diferentes superaquecimentos e variação da vazão de um gás inerte durante o processo de solidificação.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., 2002, João Pessoa. *Anais...*João Pessoa, 2002.

ROHATGI, P., **Cast Metal-Matrix Composites – squeeze casting.** IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, “Casting”, 9a edition, pp. 845-847, 1988.

SANTOS, R. S dos. **Análise de resistência ao impacto da liga al-mg-zn solidificada através do método de solidificação “squeeze casting”.** 2013. 44 f. Bacharel em Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Pará. 2013.

SIQUEIRA, C. A.; CHEUNG, N.; GARCIA, A. The Columnar to Equiaxed Transition during Solidification of Sn-Pb Alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 351, p. 126-134, 2003.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos.** 5. ed. São Paulo: E. Blucher, 1982. 286p.

SUCATAS.COM, **Lacres ou Anéis de Latinhas de Alumínio. Mitos e Verdades.** Disponível em: <[http://sucatas.com/portal/reciclagem/mat\\_didatico\\_view/309-LACRES-ou-ANEIS-de-latinhas-de-aluminio-Mitos-e-verdades-0](http://sucatas.com/portal/reciclagem/mat_didatico_view/309-LACRES-ou-ANEIS-de-latinhas-de-aluminio-Mitos-e-verdades-0)>. Publicado em 2016, acesso 25. Agos. 2016.

SKOLIANOS, S. M, KIOURTSIDIS, G. and XATZIFOTIOU. **Effect of applied pressure on the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast aluminum AA6061 alloy,** Mater. Sci. Eng. A231, pp. 17-24, 1997.