



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CAMILA VALENTINA RIBEIRO PORTILHO**

**EFEITO DA PRESSÃO NA MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL E  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA Al- 6%Cu- 2%Mg OBTIDA  
ATRAVÉS DO PROCESSO *SQUEEZE CASTING***

Marabá-PA

2018

CAMILA VALENTINA RIBEIRO PORTILHO

**EFEITO DA PRESSÃO NA MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL E  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA Al- 6%Cu- 2%Mg OBTIDA  
ATRAVÉS DO PROCESSO *SQUEEZE CASTING***

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

Marabá-PA

2018

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

---

Portilho, Camila Valentina Ribeiro

Efeito da pressão na modificação estrutural e propriedades mecânicas da liga al- 6%cu- 2%mg obtida através do processo squeeze casting / Camila Valentina Ribeiro Portilho ; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2018.

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, 2018.

1. Fundição. 2. Ligas de alumínio. 3. Ligas de cobre. 4. Magnésio. 5. Engenharia de materiais. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. III. Título.

CDD: 22. ed.: 671.2

---

CAMILA VALENTINA RIBEIRO PORTILHO

**EFEITO DA PRESSÃO NA MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL E  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA Al- 6%Cu- 2%Mg OBTIDA  
ATRAVÉS DO PROCESSO SQUEEZE CASTING**

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

Data de aprovação: 13/03/18

Conceito: EXCELENTE

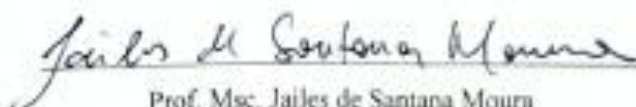
Banca examinadora:



Prof. Msc. Márcio Paulo de Araújo Mafra  
Orientador- UNIFESSPA



Prof. Dr. Elias Fagury Neto  
Membro Interno- UNIFESSPA



Prof. Msc. Jailes de Santana Moura  
Membro Externo

A minha mãe, Maria Portilho que me apoiou e incentivou em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que me capacitou de sabedoria e discernimento para chegar onde estou.

A minha mãe, por sempre me apoiar e compreender, mesmo nos momentos mais difíceis, pelo seu carinho e amor. Obrigada por sempre me ensinar a ser uma pessoa melhor!

Aos meus colegas da FEMAT 2013, em especial ao grupo “Dark Side”, Glaci, Ari, Jailson e Elton, obrigada por toda paciência, sem vocês teria sido mais difícil.

Ao Idailson Santos e Thales Lima, por toda ajuda prestada no decorrer desse trabalho.

Ao meu orientador, Márcio Mafra, por toda paciência, compreensão, indicação dos caminhos necessários e por não ter medido esforços na orientação deste trabalho.

Ao professor, Adriano Rabelo, pelas oportunidades e confiança dada nesses 5 anos e a todos os professores do curso de Engenharia de Materiais que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação.

A todos que de alguma forma contribuíram nessa árdua caminhada.

“A certeza não existe, nem a perfeita verdade. Mas sempre nos resta a fé, que nos faz confiar no impossível. E o impossível, com frequência, se torna concreto” (A Batalha do Apocalipse).

## RESUMO

Squeeze Casting é um processo inovador dentro dos processos de fundição, no qual o metal vazado no estado líquido é solidificado sob pressão dentro de uma coquilha metálica fechada por um punção. Ele é conhecido como fundição sem defeitos, pois apresenta peças de excelente qualidade, sem formação de bolhas, porosidades, rechupes, defeitos de Schinkage e macrossegregação, estes influenciam diretamente nas propriedades mecânicas dos produtos fundidos. Desta forma, o presente trabalho buscou analisar a influência da pressão na modificação estrutural e nas propriedades mecânicas de uma liga binária do sistema Al-Cu-Mg, solidificando o metal líquido sem pressão e sob pressões de 80, 120 e 160 MPa. Para a análise da liga realizou-se ensaios de impacto, tração e dureza, assim como caracterização estrutural, através da análise macro e microestrutural. Para atestar a conformidade da liga foi feita análise química através do EDS (Espectrômetro de energia dispersiva). Pôde-se observar que houve influência da pressão sobre a macro e microestrutura dos lingotes. Constatou-se um aumento significativo na resistência à tração e ao impacto com o aumento da pressão.

Palavras chaves: squeeze casting, Al-Cu-Mg, propriedades mecânicas e caracterização estrutural.



## **ABSTRACT**

Squeeze Casting is an innovative process within the casting process in which the molten metal in the liquid state is solidified under pressure inside a metal shell closed by a punch. It is known as casting without defects, because it presents pieces of excellent quality, without formation of bubbles, porosities, rechupes, defects of Schinkage and macrossegregation, these influence directly on the mechanical properties of the products melted. Thus, the present work sought to analyze the influence of pressure on the structural modification and mechanical properties of a binary alloy of the Al-Cu-Mg system, solidifying the liquid metal without pressure and under pressures of 80, 120 and 160 MPa. For the alloy analysis, impact, tensile and hardness tests were performed, as well as structural characterization, through macro and microstructural analysis. In order to verify the conformity of the alloy, chemical analysis was done through EDS (Dispersive Energy Spectrometer). It was possible to observe that there was influence of the pressure on the macro and microstructure of the ingots. There was a significant increase in tensile strength and impact with increasing pressure.

Keywords: squeeze casting, Al-Cu-Mg, mechanical properties and structural characteristics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1-</b> Efeito dos elementos nas propriedades da liga de Alumínio .....	18
<b>Figura 2-</b> Principais elementos e classificação das ligas de Alumínio.....	19
<b>Figura 3-</b> Diagrama de fase Al-Cu.....	21
<b>Figura 4-</b> Diagrama de fase Al-Mg.....	23
<b>Figura 5-</b> Esquema do processo Squeeze Casting. (a) Fusão do Metal, pré-aquecimento do molde e lubrificação. (b) Vazamento na coquilha. (c) Solidificação do molde sob pressão. (d) ejeção da peça, limpeza da coquilha e recarga.....	25
<b>Figura 6-</b> Tipos de fundição sob pressão (a) direta e (b) indireta.....	26
<b>Figura 7-</b> Classificação dos tipos de fundição sob pressão levando-se em conta a geometria da peça: (a) direta, (b) com extrusão e (c) indireta.....	27
<b>Figura 8-</b> Representação esquemática de um metal puro solidificado unidirecionalmente mostrando as estruturas coquilhada, colunar e equiaxial.....	31
<b>Figura 9-</b> Correlação entre taxa de resfriamento e microestrutura resultante.....	32
<b>Figura 10-</b> Representação esquemática dos parâmetros microestruturais: (a) Espaçamento celular ( $\lambda_C$ ); (b) Espaçamento dendrítico primário ( $\lambda_1$ ); (c) Espaçamento dendríticos secundário( $\lambda_2$ ).....	33
<b>Figura 11-</b> Máquina de ensaio de tração esquemática.....	34
<b>Figura 12-</b> Tipos mais usados de corpos de prova para ensaio de tração.....	35
<b>Figura 13-</b> Alguns parâmetros importantes definidos com auxílio da curva tensão versus deformação de engenharia.....	36
<b>Figura 14-</b> Equipamento para o ensaio de impacto.....	37
<b>Figura 15-</b> Tipos de corpos de prova Charpy.....	38
<b>Figura 16-</b> Escalas comparativas. dos valores para os vários métodos de durezas e aplicações recomendáveis para diversos materiais.....	40
<b>Figura 17-</b> Penetrador para a dureza Rockwell .....	41
<b>Figura 18-</b> (a) Cadinho de carbetto de silício e (b) Forno elétrico utilizado na fusão das ligas.....	43
<b>Figura 19-</b> (a)Perfil da Lingoteira de aço 1045 e (b) Prensa hidráulica semi-automática utilizada.....	44
<b>Figura 20-</b> (a) Microscópio óptico com interface digital, (b) Microduromêtro (c), Máquina de Ensaio mecânicos e (d) EDS.....	45

<b>Figura 21-</b> Fluxograma da metodologia adotada.....	46
<b>Figura 22-</b> (a) controle da temperatura com auxílio de termopar, (b) vazamento da liga fundida e (c) aplicação da pressão na liga que se encontra na lingoteira. ....	47
<b>Figura 23-</b> Lingotes após serem desmoldados da lingoteira. ....	47
<b>Figura 24-</b> Lingotes cortados ao meio longitudinalmente.....	48
<b>Figura 25-</b> (a) máquina politriz e (b) lixadeira. ....	48
<b>Figura 26-</b> Dimensões proporcionais do pino de leitura do teste de tração recomendado pela norma ASTM - E 8M – 03 Métrico, 2001. Em destaque, no quadrado, o utilizado no procedimento deste trabalho.....	50
<b>Figura 27-</b> Corpos de prova utilizados no ensaio de tração conforme a norma ASTM E 8M.....	50
<b>Figura 28-</b> Corpo de prova preso nas garras da máquina de ensaios.....	51
<b>Figura 29-</b> Corpos de prova utilizados. ....	52
<b>Figura 30-</b> Máquina de ensaio utilizada. ....	52
<b>Figura 31-</b> Macroestrutura da liga Al-6%Cu-2%Mg: a) sem pressão; b)80 MPa; c) 120 MPa; d) 160 MPa. Ataque de Keller's.....	53
<b>Figura 32-</b> Microestrutura da liga Al- 6%Cu-2%Mg: (a) sem pressão, (b) 80 MPa, (c) 120 MPa e (d)160 MPa.....	54
<b>Figura 33-</b> a)Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-1%Mg e (b) espectrômetro da mesma. ....	55
<b>Figura 34-</b> Análise Química da liga Al- 6%Cu- 2%Mg.....	56
<b>Figura 35-</b> (a) Mapa de distribuição de elementos presentes na liga (vermelho) Alumínio, (azul) Magnésio, (verde) cobre, (b) Distribuição do Alumínio, (c) Distribuição do cobre e (d) Distribuição do Magnésio.....	57
<b>Figura 36-</b> Comparação das curvas características- Representatividade da Média.....	58
<b>Figura 37-</b> Fractografia da superfície de fratura com aumento de 100x. (a) Sem pressão, (b) 80 MPa, (c) 120 MPa e (d) 160 MPa.....	59
<b>Figura 38-</b> Gráfico de Dureza x Impacto.....	61
<b>Figura 39-</b> Fractografia da superfície de fratura com aumento de 100x, (a) sem pressão, (b) 80 MPa), (c) 120 MPa e (d)160 MPa. ....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
$\mu\text{m}$	Micrômetro
$\text{g/cm}^3$	Grama por centímetro cúbico
$\alpha$	Alpha
$\beta$	Beta
Si	Silício
Al	Alumínio
M	Molar
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alumina
Cu	Cobre
Mg	Magnésio
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
Kg	Quilograma

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	17
3.2 LIGAS DE Al- Cu .....	20
3.3 LIGAS DE Al-Mg .....	22
3.4 SQUEEZE CASTING .....	23
<b>3.4.1 Mecanismos do Processo</b> .....	24
<b>3.4.2 Parâmetros do Processo</b> .....	28
3.5 METALOGRAFIA.....	30
<b>3.5.1 Macrografia</b> .....	30
<b>3.5.2 Micrografia</b> .....	32
3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	34
<b>3.6.1 Ensaio de Tração</b> .....	34
<b>3.6.2 Ensaio de Impacto</b> .....	36
<b>3.6.3 Ensaio de Dureza</b> .....	39
3.6.3.1 Dureza Rockwell .....	40
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	42
4.1 MATERIAIS .....	42
4.2 METODÓS.....	45
<b>4.2.1 Confecção dos lingotes</b> .....	46
<b>4.2.2 Metalografia</b> .....	48
4.2.2.1 Macro e Micrografia.....	48
<b>4.2.3 Composição Química</b> .....	49

<b>4.2.4 Propriedades Mecânicas</b> .....	49
4.2.4.1 Ensaio de Tração .....	49
4.2.4.2 Ensaio de impacto.....	51
4.2.4.3 Dureza Rockwell .....	52
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
5.1 METALOGRAFIA.....	53
<b>5.1.1 Macrografia</b> .....	53
<b>5.1.2 Micrografia</b> .....	54
5.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	55
5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	57
<b>5.3.1 Ensaio de Tração</b> .....	57
5.3.1.1 Fractografia.....	59
<b>5.3.2 Ensaio de Dureza</b> .....	59
<b>5.3.3 Ensaio de Impacto</b> .....	60
5.3.3.1 Fractografia.....	61
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	63
6.1 ASPECTO MACRO E MICROESTRUTURAL .....	63
6.2 ANÁLISE DO LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E DUREZA .....	63
6.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO .....	63
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	64
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

A técnica de fundição é utilizada pelo homem há mais de 6.000 anos, iniciando-se com metais de baixo ponto de fusão, como o cobre e o bronze, posteriormente com o ferro. Em fornos rudimentares de pedras e cerâmicas, fundia-se minérios de metais para confecção de armas e adornos.

Contudo a crescente utilização de processos de fundição na produção de peças de maior precisão e em maiores quantidades e, sobretudo o emprego cada vez maior da automação nesses processos, tem exigido o desenvolvimento de métodos de análise mais elaborados, que levem a um equacionamento e a um controle mais preciso dos mesmos.

Sendo assim, o processo *squeeze casting* vem sofrendo um grande desenvolvimento, pelo fato do mesmo possuir um grande potencial para criar componentes fundidos com um menor número de defeitos (GHOMASHCHI, 2000)

*Squeeze Casting* define-se como uma combinação das tecnologias da fundição e do forjamento, na qual o metal líquido adquire a forma da cavidade (moldação), solidificando sob pressão, onde o metal líquido é solidificado ao mesmo tempo em que sofre uma pressão hidrostática. É um termo genérico para especificar uma técnica de fabricação onde a solidificação é realizada sob alta pressão em um molde permanente (GHOMASHCHI, 2000).

Através desse processo se tem um refinamento do grão, um excelente acabamento superficial, assim como eliminação de porosidades e rechupes. As propriedades mecânicas sofrem um significativo aumento, em comparação ao método tradicional de fundição e, além disso, peças fabricadas por *squeeze casting* possuem soldabilidade superior e são aptas a tratamentos térmicos, quando comparadas ao processo de fundição comum, peças fabricadas por esse processo são formadas em uma só operação com um menor consumo de energia (GHOMASHCHI, 2000; CHADWICK *et al*, 1996).

Atualmente, componentes de ligas de alumínio, cobre, magnésio, ferro fundido, aços inoxidáveis e de superligas à base de níquel são facilmente fabricados por *squeeze casting*. A utilização de ligas de alumínio na fundição vem aumentando muito ao longo das décadas. Esses materiais proporcionam importantes vantagens em suas aplicações, como ótimas características mecânicas, peso reduzido e alta condutividade térmica. As aplicações incluem componentes automotivos como pistões, discos de freio, rodas e cubos, componentes de mísseis e engrenagens (DORCIC *et al*, 1988). Recentemente, a técnica de *squeeze casting* tem

sido muito estudada para o uso na fabricação de compósitos de matriz metálica, especialmente em ligas de magnésio, alumínio e cobre (ROHATGI, 1988).

Diante disso, o estudo do processo *squeeze casting* se constitui num importante campo de pesquisa científica e tecnológica na área de engenharia de materiais. No presente trabalho foram realizados experimentos que aplicaram esse processo nas ligas Al-6%Cu- 2%Mg, com o objetivo de analisar a influência da pressão na modificação estrutural e nas propriedades mecânicas.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a resistência mecânica, dureza, tração e impacto, bem como as características microestruturais da liga Al-6%Cu-2%Mg fabricada por “*Squeeze Casting*” em variadas pressões.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analisar a macroestrutura das ligas de Al-Cu-Mg e comparar os resultados com os já existentes na literatura;
- ✓ Analisar a microestrutura da liga e correlacionar os resultados com as propriedades mecânicas – limite de resistência à tração, tenacidade ao impacto e dureza;
- ✓ Realizar análise química da liga por EDS (Espectrômetro de energia dispersiva), a fim de atestar sua conformidade;
- ✓ Comparar os resultados de resistência à tração da liga analisada com outras ligas Al-Mg;
- ✓ Relacionar a dureza com a resistência ao impacto;
- ✓ Analisar a região da fratura dos corpos de prova.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão abordados os temas pertinentes a este trabalho e que servem de embasamento técnico-científico para o desenvolvimento do estudo realizado pelo autor, tendo como base o conhecimento amplo acerca do processo *squeeze casting*, a liga obtida através do mesmo, bem como suas matérias-primas e principais ensaios executados.

#### 3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Uma das características peculiares do Alumínio e suas ligas é sua densidade relativamente baixa ( $2,7\text{g/cm}^3$ , em comparação com a densidade de  $7,9\text{g/cm}^3$  do aço), condutividade elétrica e térmica elevadas e certa resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, devido ao seu alto poder redutor através da formação da camada de óxido. A principal limitação do Alumínio está em algo que para algumas aplicações é um ponto forte que é a sua baixa temperatura de fusão ( $660^\circ\text{C}$ ), o que restringe a temperatura máxima de uso. Ao adicionar elementos de liga o ponto de fusão pode variar em função do soluto (CALLISTER, 2002).

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na terra, desde o fim do século XIX a emergência de três desenvolvimentos industriais importantes, a saber, (automobilismo, aviação e indústria elétrica), junto com a necessidade por um material com as características inerentes do alumínio, beneficiou e muito o crescimento da população e da utilização do novo metal. Em virtude da facilidade de transformação do alumínio ele se torna viável a indústria da manufatura (ROOY, 1990).

Uma das vantagens mais importantes do alumínio é o fato dele poder ser processado com facilidade. Pelo fato do mesmo ter uma elevada ductilidade pode ser laminado em qualquer espessura e estruturado numa infinidade de perfis de seção transversal constante e grande comprimento. O metal também pode ser forjado ou impactado. A facilidade e a velocidade com o qual o alumínio pode ser usinado é outro importante fator que contribui para difundir o uso desse material e que também aceita, praticamente, todos os métodos de união, tais como rebiteagem, soldagem, brasagem e colagem (ABAL, 2014).

O alumínio pode ser fundido e trabalhado de diversas maneiras e pode-se obter uma grande variedade de formas. Com todas estas propriedades apresentadas, não é surpresa que as ligas de alumínio vêm sendo de suma importância para engenharia de materiais (SMITH, 1998).

A reciclabilidade é outro atributo do alumínio e reforça a vocação de sua indústria para a sustentabilidade em termos econômicos, sociais e ambientais. O alumínio pode ser reciclado infinitas vezes sem perder suas características no processo de reaproveitamento, além da economia dos recursos naturais, energia elétrica, entre outros (ABAL, 2012).

Em suma pode-se inferir que a importância do alumínio para o setor industrial é principalmente pela ávida procura pela substituição de componentes automobilísticos produzidos com materiais ferrosos, objetivando-se um menor peso nos veículos e conseqüentemente um menor consumo de combustíveis (LEE *et al*, 2001).

Certas ligas de alumínio podem superar a resistência de alguns aços estruturais, todavia o alumínio puro e algumas de suas ligas exibem uma resistência mecânica relativamente baixa (ASM HANDBOOK, 1992). As ligas de Alumínio são formadas principalmente com adição de Cobre (Cu), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Silício (Si), Zinco (Zn) ao Alumínio.

A incorporação destes metais ao alumínio tem como intuito aumentar a resistência mecânica, melhorar as características de fundição, aumentar a facilidade de soldadura e em alguns casos melhorar as propriedades anticorrosivas. A escolha dos elementos e suas proporções dependem das propriedades finais que se pretendem obter (EAA, 2012). Na Figura abaixo tem-se alguns exemplos:

**Figura 1-** Efeito dos elementos nas propriedades da liga de Alumínio

<b>Elementos de liga</b>	<b>Influências dos elementos de liga</b>
Cobre	Aumenta a resistência mecânica
Manganês	Aumenta a resistência mecânica e ligeiramente a resistência à corrosão, em particular a resistência à corrosão sob tensão
Silício	Aumenta a resistência à corrosão e melhora a característica de fundição
Magnésio	Aumenta a resistência mecânica e resistência à corrosão em geral e proporciona maior facilidade de soldadura
Zinco	Aumenta a resistência mecânica e a resistência à corrosão em meios alcalinos e maior facilidade de soldadura

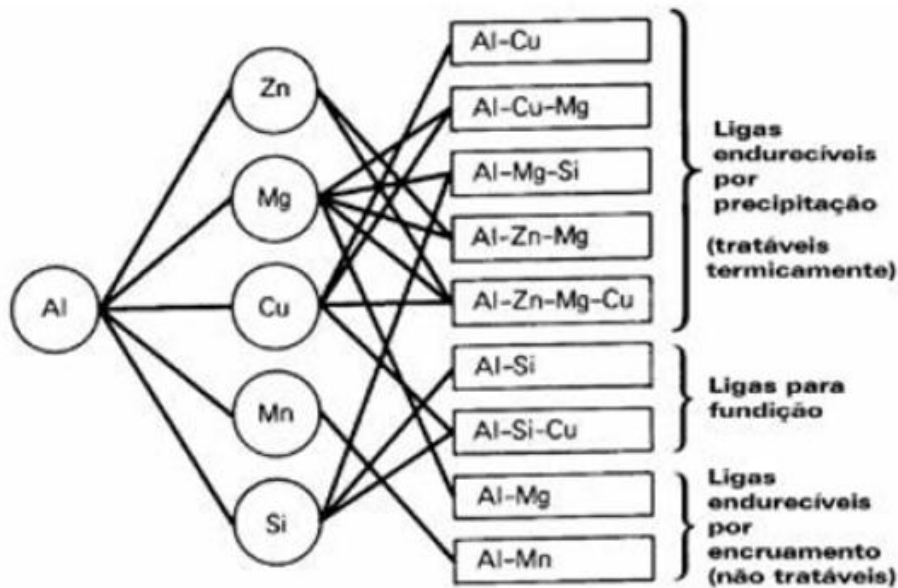
**Fonte:** FERREIRA et al, 1997

É possível combinar simultaneamente diferentes elementos de liga ao alumínio, o magnésio e o silício (Al-Mg-Si), por exemplo, quando combinados formam a liga Al-Mg-Si que apresenta uma resistência mecânica inferior à das ligas de alumínio e cobre (Al-Cu), mas

que possuem uma maior resistência à corrosão e são facilmente moldadas e soldadas. Permitem ainda vários tipos de acabamento, como por exemplo, polimento, lacagem, anodização, sendo por isso utilizadas na construção civil, na indústria alimentar e em aplicações envolvendo ambientes marítimos.

Na literatura é possível encontrar vários tipos de classificação para as ligas de alumínio. Os mais usuais são: ligas para trabalho mecânico e ligas para fundição. Essas ligas são especificadas segundo o sistema de numeração desenvolvida pela Aluminium Association, onde as ligas são designadas por EN AW/AC-XXXX, ligas trabalhadas e ligas fundidas respectivamente, em que XXXX são séries de quatro números, sendo o primeiro relativo aos principais elementos da liga (FERREIRA *et al*, 1997). Porém a classificação mais usual e a que divide as ligas de Alumínio em dois grandes grupos, as Ligas Trabalhadas ou Dúcteis, e as Ligas Fundidas.

**Figura 2-** Principais elementos e classificação das ligas de Alumínio.



**Fonte:** HANDBOOK, 1993.

Existem inúmeras possibilidades de combinações de elementos químicos com o alumínio. Estas combinações denominadas de ligas de alumínio têm como objetivo principal melhorar as propriedades mecânicas da liga e conferir outras propriedades de uso ou características de fundição de acordo com a necessidade para determinado fim. (MALAVAZZI, 2002).

Assim as Ligas de Alumínio para fundição de uso comercial tem na sua composição química:

- a) Elementos Principais: responsáveis pelas propriedades mecânicas como Cobre, Silício, Magnésio, Manganês, Zinco;
- b) Elementos Secundários: cujos percentuais são menores e tem como objetivo uma ação específica para se obter determinada propriedade de uso ou característica de fundição como: Níquel, Ferro, Berílio;
- c) Elementos modificadores, refinadores ou neutralizadores: usados em pequenos percentuais com a finalidade de alterar a microestrutura, obtendo-se melhores propriedades ou características de processo como Titânio, Sódio, Estrôncio, Boro;
- d) Elementos tidos como impurezas: os quais devem ser controlados ou balanceados de maneira mais rigorosa como: Chumbo, Cromo, Cálcio, e principalmente Hidrogênio e Oxigênio, que em geral exercem influência perniciosa sobre certas propriedades ou características de fundição.
- e) Os elementos, prata, gálio, germânio, são muito caros, e economicamente inviáveis. O lítio em função das dificuldades de processo, tem seu uso bastante restrito à ligas especiais.

Teoricamente as melhores combinações de resistência e ductilidade em ligas metálicas resultam de uma estrutura monofásica, onde todos os elementos estão dissolvidos na matriz. Para as ligas de alumínio isto não é possível, pois a solubilidade dos elementos é muito limitada (MOLINARI, 1997).

### 3.2 LIGAS DE Al- Cu

A resistência mecânica do alumínio não é elevada, contudo a adição de elementos de liga como o cobre, associada à aplicação de tratamento térmico, pode ocasionar um grande ganho da resistência no material pela formação de precipitados (SMITH, 1998).

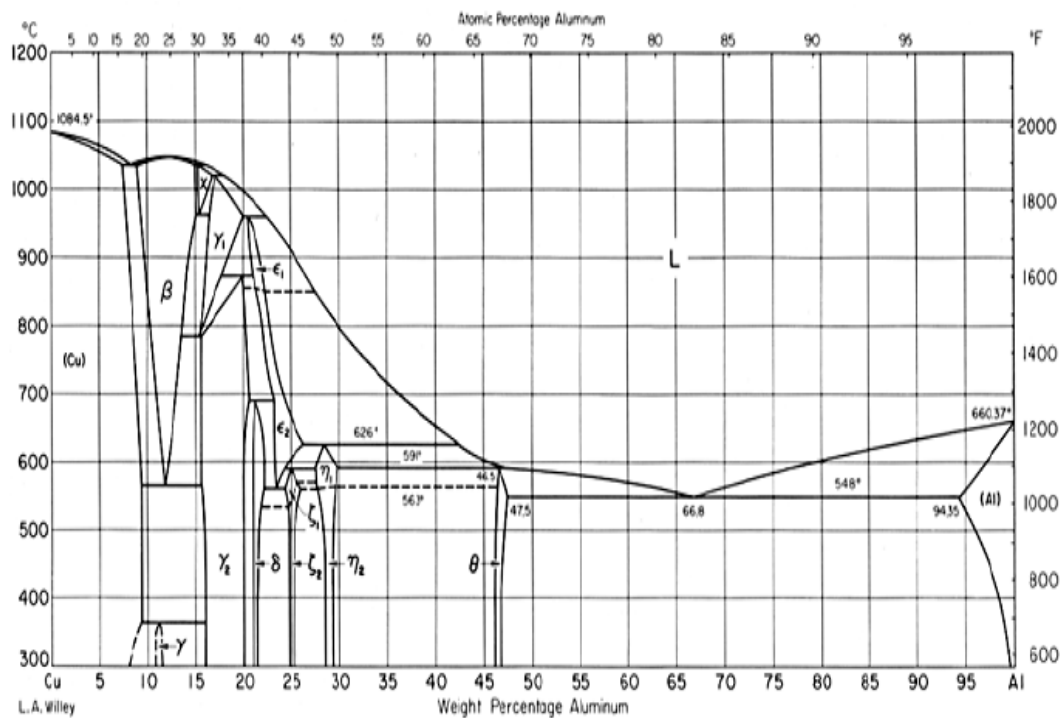
O cobre foi um dos primeiros elementos de liga empregados e ainda apresenta uma grande utilização. Este elemento aumenta a dureza das ligas, apresenta uma boa resistência mecânica e excelente usinabilidade, porém, diminui o alongamento, prejudica a fluidez do material e diminui a ocorrência de fissuras a quente. Sua adição promove aumento à resistência da liga com ou sem tratamento térmico. (CHIAVERINI, 1986)

Nestas ligas, algumas propriedades aumentam progressivamente com a adição de cobre, tais como a resistência mecânica e a dureza, porém somente até o percentual de 12%, sendo que acima deste percentual a liga torna-se quebradiça (SANTOS, 2007).

Quando estas ligas tem entre 4 e 6% de cobre elas respondem fortemente ao tratamento térmico. Porém o cobre reduz a resistência a corrosão em geral sob algumas condições específicas como a corrosão sob tensão. Adições de cobre também reduzem a resistência à trinca de contração e diminuem a fundibilidade (HANDBOOK, 1992).

Dessa forma além da escolha da liga, deve ser enfatizado que as propriedades mecânicas do fundido são fortemente influenciadas pela microestrutura que é resultado do processo de fundição e das condições de resfriamento. A Figura 3 exemplifica o diagrama binário da liga Cu-Al.

**Figura 3-** Diagrama de fase Cu-Al.



**Fonte:** HANDBOOK, 1992.

O cobre é adicionado nas ligas fundidas usualmente entre 4% e 5% (podendo chegar a 10%) dependendo da aplicação do componente fundido. As vantagens da presença do cobre nas peças fundidas, são uma diminuição na contração interna durante o resfriamento, deixando a liga com maior intervalo (solidificação pastosa) e melhoramento na usinabilidade de peças fundidas devido à precipitação de compostos  $\text{CuAl}_2$  (FUOCO, 2001).

A precipitação do composto  $\text{CuAl}_2$  reduz severamente a resistência à corrosão da peça, devido à redução galvânica entre o composto e a matriz onde a aplicação em ambientes úmidos ou atmosfera salina, pode levar à corrosão.

Do ponto de vista do processo de fundição a adição de cobre a liga de alumínio é benéfica, pois melhora eminentemente diversas propriedades da liga de alumínio, entretanto, ao contrário de outros elementos de liga, como o silício, o cobre acarreta fragilidade a quente e menor fluidez.

### 3.3 LIGAS DE Al-Mg

Ligas de Al-Mg não são tratadas termicamente, pois não apresentam ganho de dureza com a precipitação, e ainda causa susceptibilidade a corrosão nos contornos de grão, sendo necessário o endurecimento por encruamento. A liga de Al-Mg propicia elevada ductilidade, resistência à corrosão e soldabilidade, baixa densidade quando comparada a outros materiais metálicos estruturais, boa fluidez, assim como excelente acabamento superficial. É aplicado na fabricação de utensílios domésticos, latas para bebida, estrutura automotiva, barcos e estruturas arquitetônicas e decorativas (HANDBOOK, 1992).

De acordo com Ferraresi (1969), a superfície usinada geralmente é de boa qualidade, tanto em dimensão quanto em rugosidade e as ferramentas a serem utilizadas preferencialmente são carbets de tungstênio, podendo o aço rápido ou o aço carbono operarem gerando bons resultados.

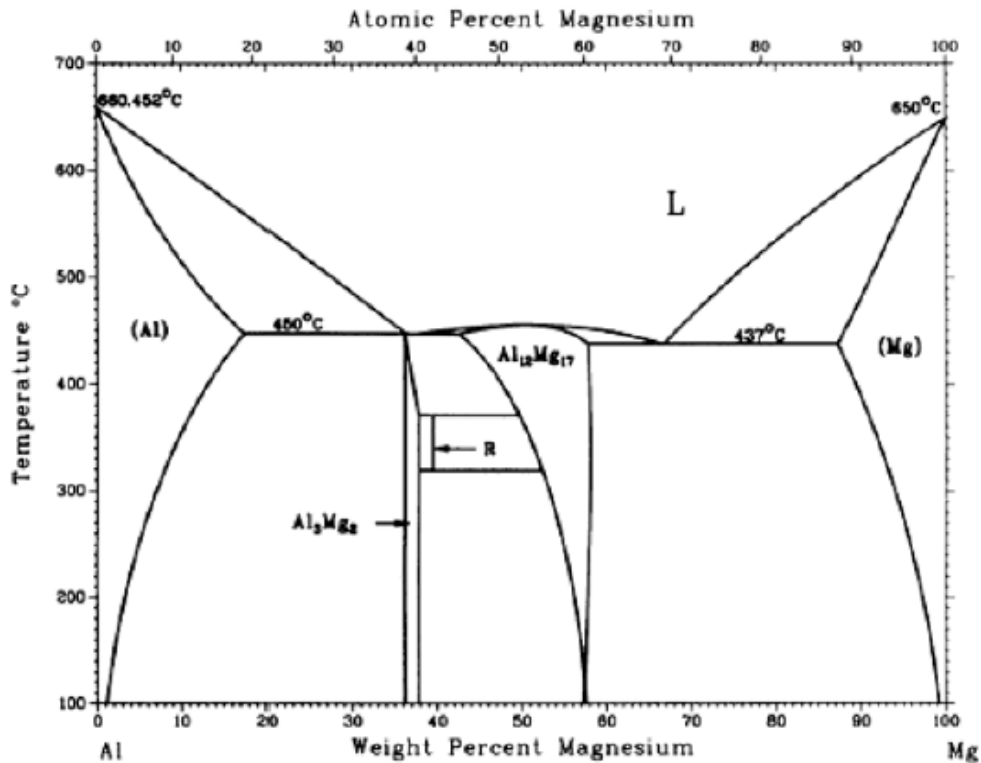
Outra característica interessante nas ligas de magnésio é sua excelente capacidade de amortecimento, se comparada a outros metais. A capacidade de amortecimento pode ser uma propriedade interessante na seleção de materiais tanto para indústria aeronáutica, como para equipamentos eletrônicos, uma vez que a capacidade de alto amortecimento não somente reduz as vibrações causadas pela deformação plástica, como também reduz vibrações causadas pela deformação elástica. (FIGUEIREDO, 2008).

As ligas de Al-Mg são melhores desenvolvidas quando apresentam teores de magnésio entre 0,5 e 6% em massa, sendo que liga com baixo teor de magnésio tem elevada taxa de encruamento. Para aplicações estruturais o teor de magnésio na liga é maior (ALMEIDA, 2015).

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  $Al_3Mg_2$  (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  $Al_8Mg_5$  (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  $Al_8Mg_5$  aparecendo para teores de magnésio

tão baixos como 4 ou 5 %, como mostrado na Figura 4. Esta fase é frágil abaixo de 330°C, mas apresenta alguma plasticidade em temperaturas mais altas (PINHEIRO, 2010).

**Figura 4-** Diagrama de fase Al-Mg.



**Fonte:** ALUMÍNIO E SUAS LIGAS, 2013.

A resistência mecânica da liga diminui quando a temperatura aumenta, no entanto esse processo é mais lento quando comparado com outras ligas de alumínio, provavelmente devido à formação de precipitados de magnésio próximo a discordâncias, dificultando seus movimentos. Outra característica do magnésio é a diminuição do módulo de elasticidade (MONDOLFO, 1976). Alguns elementos de liga dificultam a difusão do magnésio tal como o zinco, silício, cobre e em escala menor o ferro, manganês e níquel.

### 3.4 SQUEEZE CASTING

A fundição é um dos processos mais antigos utilizados na fabricação e o processo mais econômico para a transformação de material bruto em ferramentas úteis, porém assim como os outros processos ela apresenta falhas. Uma das suas maiores falhas para a fundição



convencional, ou mesmo para técnicas avançadas de fundição, é a formação de defeitos tais como porosidades e defeitos de segregação. Por esse motivo vem-se estudando novas técnicas de fundição no intuito de solucionar tais problemas, entre essas técnicas o *squeeze casting* possui grande potencial para criar componentes fundidos com menos defeitos (GHOMASHCHI, 2000).

*Squeeze Casting* define-se como uma combinação das tecnologias da fundição e do forjamento, na qual o metal líquido adquire a forma da cavidade (moldação), solidificando sob pressão, onde o metal líquido é solidificado ao mesmo tempo em que sofre uma pressão hidrostática. É um termo genérico para especificar uma técnica de fabricação onde a solidificação é realizada sob alta pressão em um molde permanente (GHOMASHCHI, 2000).

Essa técnica leva a um aumento da transferência de calor, provocando o refinamento do grão, excelente acabamento superficial, eliminação de porosidades e rechupes. 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, quando comparadas ao processo de fundição comum, peças fabricadas por *squeeze* são formadas em uma só operação com um menor consumo de energia. Outra vantagem desta técnica é a não necessidade de sistemas de alimentação e a gitagem, tornando o processo muito eficiente na utilização de material. Pela mesma razão, é essencial um sistema de medição do volume do metal a vaziar muito eficaz, pois a quantidade de metal vazado vai definir as dimensões finais do componente. Por essa razão é importante que se tenha controle do sistema de vazamento, pois se a variação desse for superior à variação da tolerância dimensional aceitável se terá percentagens elevadas de sucata (GHOMASHCHI, 2000; CHADWICK *et al*, 1996).

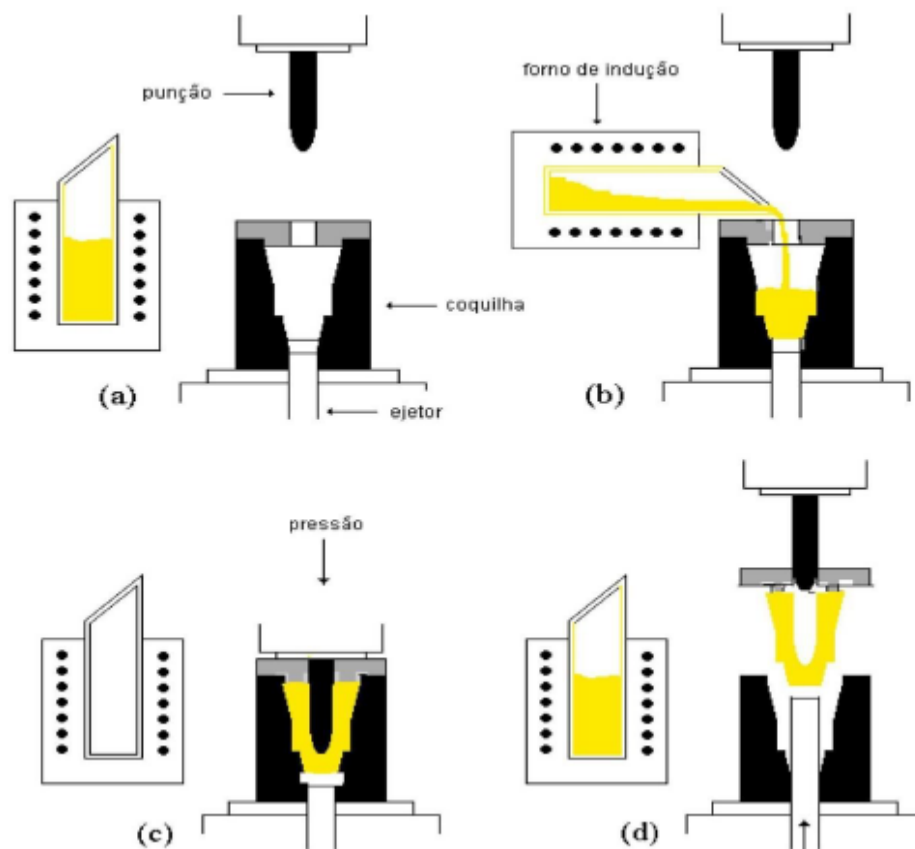
### 3.4.1 Mecanismos do Processo

De acordo com Hu (1998), no processo *squeeze casting* o metal, após fusão e vazamento, solidifica sob pressão dentro de um molde permanente posicionado entre as placas de um prensa hidráulica. O processo é mostrado esquematicamente na Figura 5 onde pode ser descrito em quatro etapas:

1. 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 ( $Al_2O_3$ - Alumina) ou grafite para facilitar a desmoldagem;

2. 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;
3. A pressão é aplicada sob o metal fundido e é mantida até que todo o metal esteja solidificado;
4. O punção retorna para sua posição original e a peça fundida é ejetada.

**Figura 5-** Esquema do processo *squeeze casting*. (a) Fusão do Metal, pré-aquecimento do molde e lubrificação. (b) Vazamento na coquilha. (c) Solidificação do molde sob pressão. (d) ejeção da peça, limpeza da coquilha e recarga.

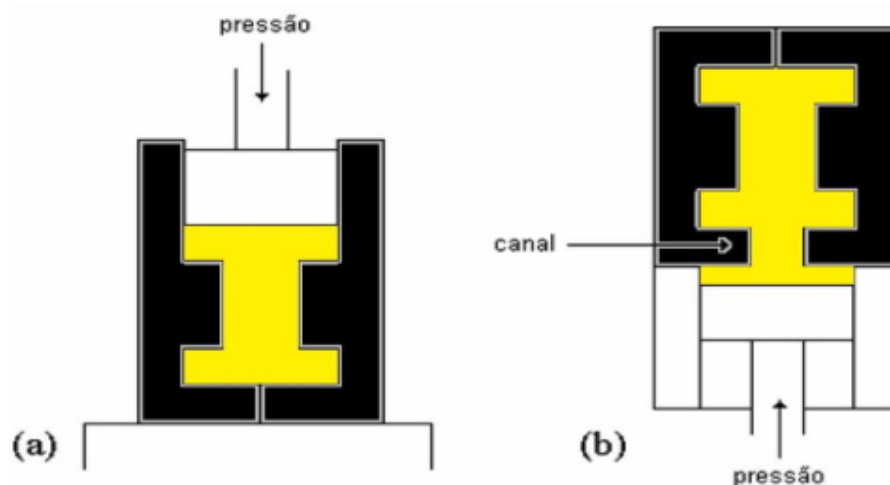


Fonte: HU, 1998

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 6(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 6(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

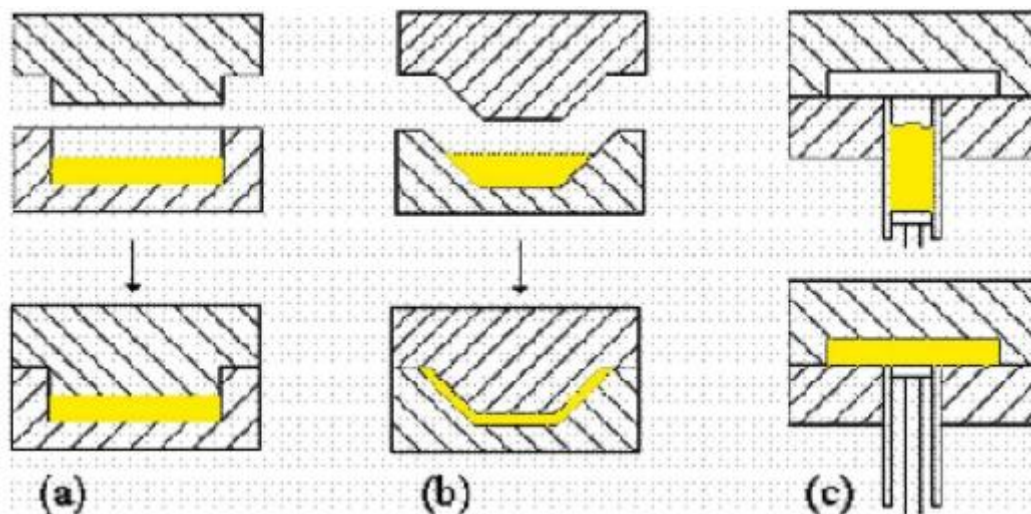
coquilha cheia a pressão é exercida apenas sobre o metal que ainda está no recipiente sendo transmitida para a peça indiretamente pelo canal. Com esta técnica é difícil manter a peça sobre alta pressão durante todo o tempo de solidificação, ou seja, é difícil trabalhar com ligas possuindo grande intervalo 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, de acordo com a Figura 7 (FEREIRA, 1999).

**Figura 6-** Tipos de fundição sob pressão (a) direta e (b) indireta.



Fonte: HU, 1998.

**Figura 7-** 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.

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 (DORCIC *et al*, 1988; FERREIRA, 1999).

É notória a diferença do comportamento de fratura de ligas fundidas por Squeeze Casting. Sabe-se que as mesmas apresentam produtos finais com menor formação de poros, por esse motivo são menos suscetíveis à fratura frágil. Os poros servem como concentradores de tensões, fazendo assim com que ocorra a propagação de trincas, ocorrendo assim fraturas do tipo frágil.

### 3.4.2 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 (DORCIC *et al*, 1988; FERREIRA, 1999).

Segundo Hu (1998), os principais parâmetros são: volume do metal fundido, aplicação da pressão, temperatura da lingoteira (coquilha), temperatura de vazamento do metal, tempo de espera antes da aplicação da pressão, tempo de pressurização e lubrificação.

Para Ghomashchi *et al* (2000), um parâmetro que também deve ser considerado é a própria liga. A composição e características físico-químicas da liga, como ponto de fusão, condutividade térmica, coeficiente de transferência de calor e soldabilidade, são parâmetros importantes devido aos efeitos direto sobre a vida da lingoteira (coquilha).

✓ 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 favorece um maior contato entre o metal líquido e as paredes da lingoteira que 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.

Trabalhos desenvolvidos por Chadwick *et al* (1989), e Franklin (1984), mostram que o refino de grão é um resultado satisfatório obtido através do processo *squeeze casting*. Entretanto esses autores têm interpretações diferentes para o refinamento de grãos. Chadwick *et al* (1989) propuseram que a pressão não tem nenhum efeito direto no refinamento de grão, eles observaram que a estrutura granular refinada é obtido pelo maior coeficiente de transferência de calor gerado devido à diminuição do *gap* entre o metal e lingoteira (coquilha), favorecendo uma maior área de contato efetiva. Franklin (1984), porém propõe que a aplicação da pressão provoca um maior resfriamento da liga superaquecida, ocasionando maiores taxas de transferência de calor, favorecendo assim a formação de mais núcleos, refinando a microestrutura.

Em adição, a taxa de transferência de calor obtida por squeeze casting chega a ser 20 vezes a taxa de transferência encontrada em fundição por gravidade. Isto ocorre porque, devido à pressão aplicada, não há “descolamento” da camada de metal solidificado na parede do molde o qual é uma consequência normal da contração do metal após solidificação. Em processos convencionais este descolamento permite a formação de um filme de ar entre o molde e o metal que oferece grande resistência à transferência de calor. Além disso, as altas

taxas de transferência de calor no processo *squeeze casting* obviamente diminuem o tempo de solidificação, para alumínio este tempo é reduzido pela metade (HU, 1998).

Dependendo da geometria e das propriedades mecânicas requeridas, a pressão aplicada varia de 50 a 140 MPa sendo 70 MPa o valor frequentemente utilizado (FERREIRA, 1999).

Geralmente as dendritas e os espaçamentos dendríticos de peças fundidas sob compressão são menores em relação aqueles de peças fundidas na ausência de pressão, Skolianos et al 1997 mostraram ainda que a intensidade da pressão aplicada pode modificar a proporção de fases presentes na região interdendrítica, como no caso da liga de alumínio AA-6061.

Diante disso é possível inferir que a pressão tem efeito considerável no que concerne a microestrutura da liga fundida por *squeeze casting*, assim como das propriedades mecânicas, pois sabe-se que microestruturas mais refinadas apresentam uma maior resistência mecânica.

✓ **Superaquecimento:** a temperatura de vazamento influencia diretamente na qualidade da peça e na vida útil da coquilha (lingoteira). 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. Segundo Hu (1998), a determinação do superaquecimento depende de alguns fatores, tais como: temperatura liquidus, taxa de resfriamento do metal e complexidade da lingoteira. Para o alumínio as temperaturas de superaquecimento podem ser em torno de 10 a 100°C acima da linha *liquidus*.

✓ **Volume do metal fundido:** é um parâmetro crítico de fundição por pressão direta, pois as dimensões finais da peça dependem da quantidade metal inserido na coquilha antes da aplicação da pressão. É um parâmetro que requer bastante atenção, pois o não controle do mesmo pode levar ao não preenchimento da coquilha, assim como do desperdício de fundido.

✓ **Temperatura das ferramentas:** as temperaturas de operação da coquilha (lingoteira) e do punção são parâmetros que afetam diretamente a taxa de transferência de calor da peça. A seleção apropriada da temperatura das ferramentas deve ser feita entre o balanço, entre a temperatura suficiente para evitar uma solidificação prematura, gotas frias na superfície fundida, fadiga térmica nas ferramentas, bem como impedir que as ferramentas superaquecidas possam causar pontos quentes gerando poros de shrinkage na peça (HU, 1998).

Para Dorcic *et al* (1988), a lingoteira deve estar aquecida entre 190 e 315 °C e o punção entre 15 e 30°C. Temperaturas superiores que 300°C não são recomendadas para ligas de alumínio (HU, 1998).

✓ Tempo: de acordo com Ghomashchi *et al* (2000), apesar do processo *squeeze casting* ser conhecido como pressurização de metal fundido, ele também pode ser usado para moldar metais semi-sólidos. Diante disso há duas maneiras de classificar o processo quanto ao tempo: antes do início da cristalização e após o início da cristalização.

- 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);

- 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 *et al*, 1988).

✓ Lubrificação: a seleção do lubrificante irá depender do material que constitui a lingoteira e composição da liga. Para a maioria das ligas não-ferrosas a desmoldagem é facilitada aplicando-se sobre a superfície quente da coquilha um lubrificante de grafite coloidal na forma de *spray*. Em ligas ferrosas um revestimento cerâmico é indicado para que não haja soldura entre o metal e a lingoteira (DORCIC *et al*, 1988).

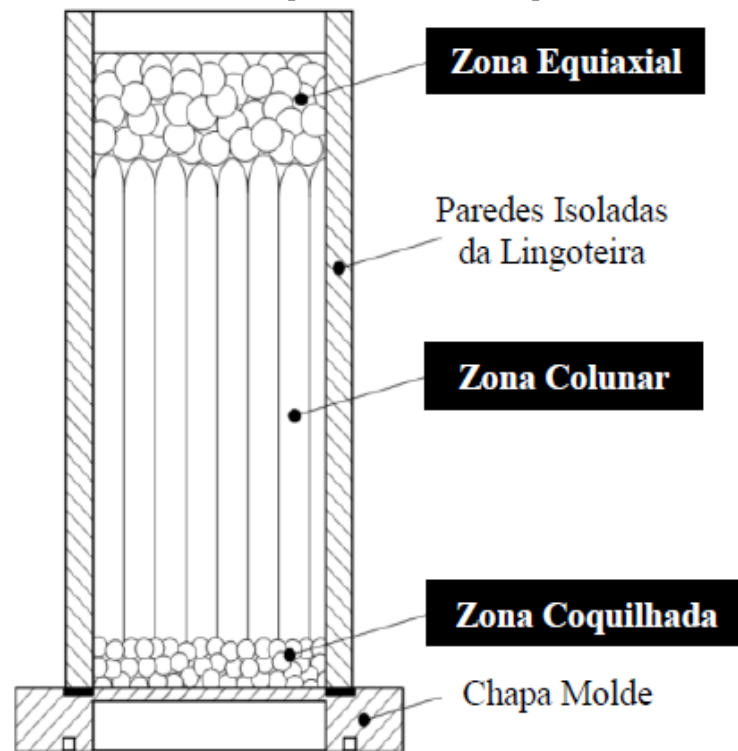
É importante que não haja excesso de lubrificante, pois poderá formar defeitos na superfície da peça. Em geral a espessura do revestimento não deve ser maior que 50 $\mu$ m (HU, 1998).

## 3.5 METALOGRAFIA

### 3.5.1 Macrografia

A estrutura bruta de solidificação de um modo geral pode ser discutida a partir das macroestruturas observadas em lingotes. Os lingotes podem apresentar três zonas distintas em sua macroestrutura (CAMPOS FILHO, 1978): zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial, como mostrado na Figura 8.

**Figura 8-** Representação esquemática de um metal puro solidificado unidirecionalmente mostrando as estruturas coquilhada, colunar e equiaxial.



Fonte: FARIA, 2015.

O líquido em contato com o molde refrigerado na parte inferior (interface metal/molde) é resfriado rapidamente devido à eficiente extração de calor, dando condições para uma nucleação intensa nessa região, originando pequenos grãos cristalinos, crescidos em direções aleatórias. Essa região é chamada de zona coquilhada.

No entanto, à medida que a isoterma *liquidus* se afasta da base refrigerada, os metais devido a sua estrutura cristalina, apresentam crescimento preferencial em certas direções definidas da rede, apresentando direções preferenciais aproximadamente paralelas à direção do fluxo de calor, dando origem a uma região de grãos alongados, chamada de zona colunar.

Com a gradativa diminuição da taxa de resfriamento pode haver condição de nucleação da fase sólida à frente da região colunar em crescimento, em regiões próximas à superfície em contato com o meio ambiente, com crescimento dos núcleos em direções aleatórias dando origem a zona equiaxial.

Maleki *et al.* (2006), constatou que a densidade de peças obtidas pelo processo *squeeze casting* sofrem influência direta da macroestrutura do material. Em sua pesquisa para a liga LM13 (liga do sistema Al-Si), com temperatura da lingoteira de 200°C e temperatura do metal de 730°C, ele verificou que para pressões abaixo de 50 MPa ainda há a presença de



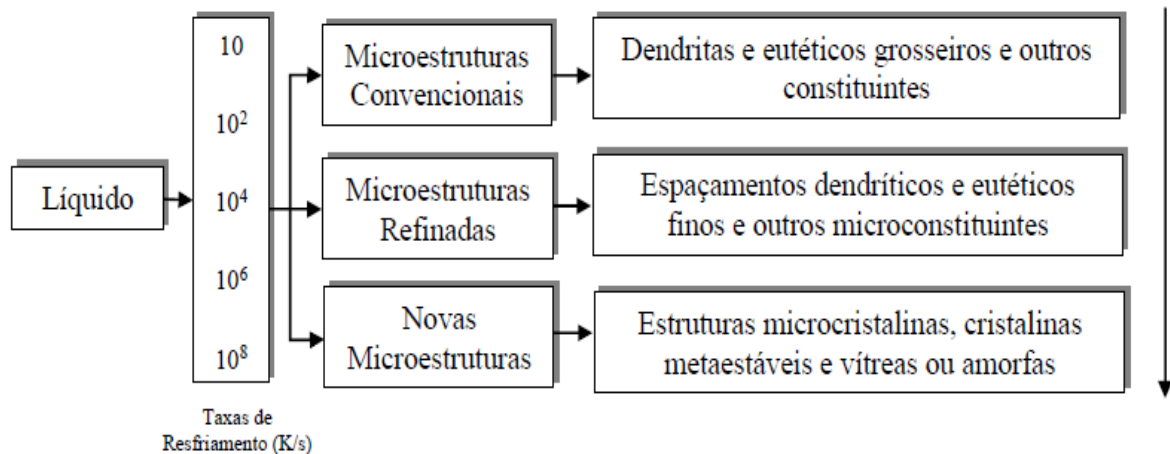
defeitos de shrinkage, posto que, para pressões acima desse valor a incidência desses defeitos são nulos. Isso conduziu a um valor de densidade menor para pressão de 20 MPa, que foi menor que o para sem pressão.

### 3.5.2 Micrografia

É noção transversal a todos os trabalhos em Squeeze Casting que o processo assegura características mecânicas superiores aos métodos de fundição convencionais devido à formação de estruturas finas e densas, e sobretudo devido à eliminação das porosidades e rechupes (GHOMASHCHI et al, 2000).

Parâmetros estruturais como tamanho de grão e espaçamentos celulares, dendríticos ou eutéticos são extremamente influenciados pela taxa de resfriamento obtida no processo de solidificação, impondo, como resultado, uma correlação entre o comportamento térmico do sistema metal/molde durante a solidificação e a microestrutura resultante. A Figura 9 mostra esquematicamente esta correlação para uma faixa de taxas de resfriamento ( $\dot{T}$ ) que cobre desde processos convencionais até situações de solidificação ultrarrápida.

**Figura 9-** Correlação entre taxa de resfriamento e microestrutura resultante.



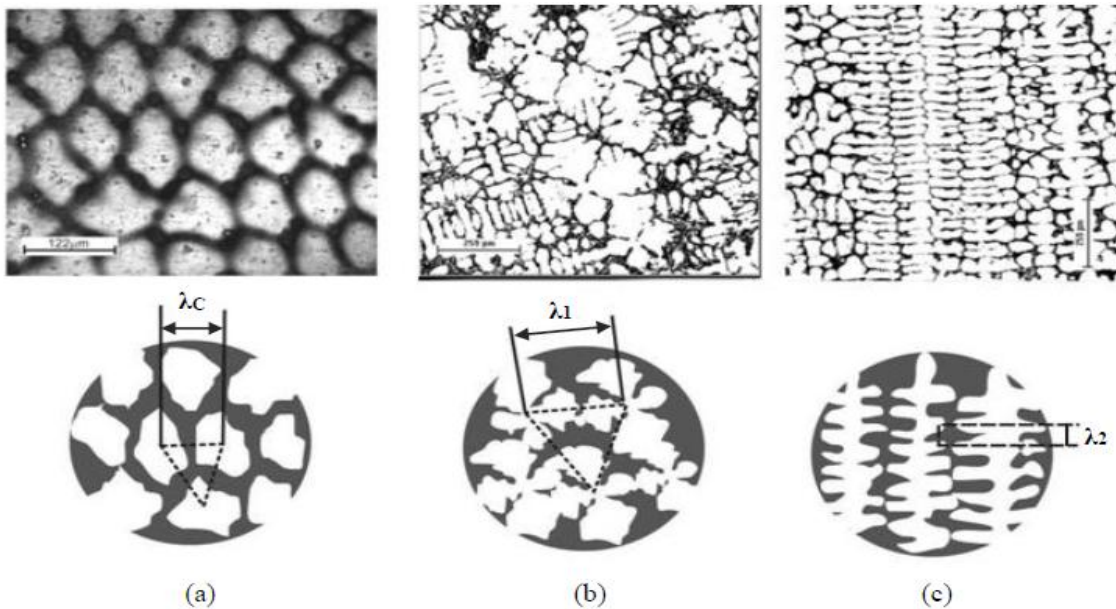
**Fonte:** GARCIA, 2007.

Em peças *squeeze casting* existe uma zona particularmente importante, debaixo do ponto de atuação do punção, onde o grão é ainda mais refinado. Esta estrutura super-refinada pode atingir espessuras de até 2 mm. Na prática podem ser produzidas peças com tolerância dimensional de 0,75 mm de maneira que, mesmo após acabamento, ainda permanecerá uma camada super-refinada na superfície de pelo menos 0,5 mm.

Em geral as dendritas e o espaçamento interdendrítico de peças fundidas sob compressão são menores que aqueles de peças fundidas na ausência de pressão, tal fato revela o motivo das propriedades mecânicas serem melhoradas quando produzidas a partir da técnica “Squeeze casting” (FERREIRA, 1999; SKOLIANOS *et. al.*, 1997).

Estudos realizados mostraram ainda que a intensidade da pressão aplicada pode modificar a proporção de fases presentes na região interdendrítica, como no caso da liga de alumínio AA- 6061. Segundo Skolianos *et al.* (1997), ao aumentar-se a pressão ocorre uma microestrutura com espaçamentos dendríticos menores, decorrendo assim em peças com tensões de ruptura mais elevadas.

**Figura 10-** Representação esquemática dos parâmetros microestruturais: (a) Espaçamento celular ( $\lambda_C$ ); (b) Espaçamento dendrítico primário ( $\lambda_1$ ); (c) Espaçamento dendríticos secundário( $\lambda_2$ ).



**Fonte:** CRUZ, 2008.

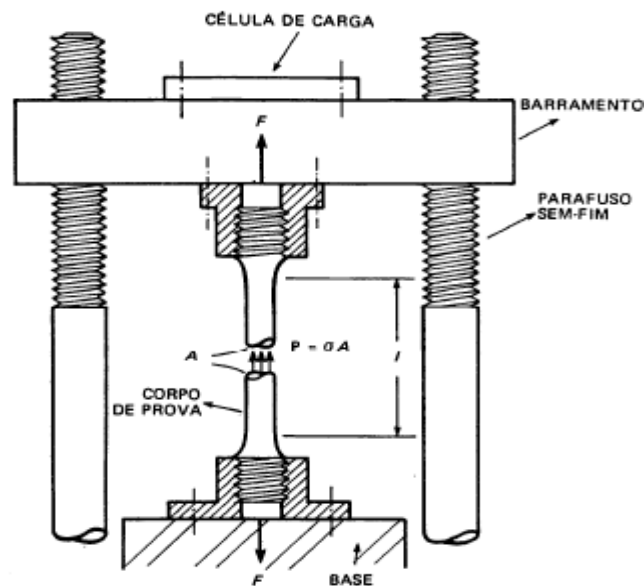
## 3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS

### 3.6.1 Ensaio de Tração

Para se determinar as propriedades mecânicas da maioria dos materiais utiliza-se principalmente ensaio de tração. Neste ensaio, um corpo de prova com formas e dimensões padronizadas é submetido a uma força de tração uniaxial que tende a esticá-lo ou alongá-lo. (PADILHA, 2000).

A cabeça do corpo de prova é fixada nas garras de uma máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial. Ao decorrer do ensaio, são medidas a força e a deformação correspondente. Geralmente, o ensaio é realizado até que o corpo de prova rompa. A Figura 11 apresenta uma máquina de ensaio de tração esquemática. Para tornar os resultados do ensaio independentes das dimensões do corpo de prova, entre outras razões, é conveniente transformar a curva força versus alongamento obtida do registro da máquina em uma curva tensão de engenharia versus alongamento de engenharia. (PADILHA, 2000)

**Figura 11-** Máquina de ensaio de tração esquemática.



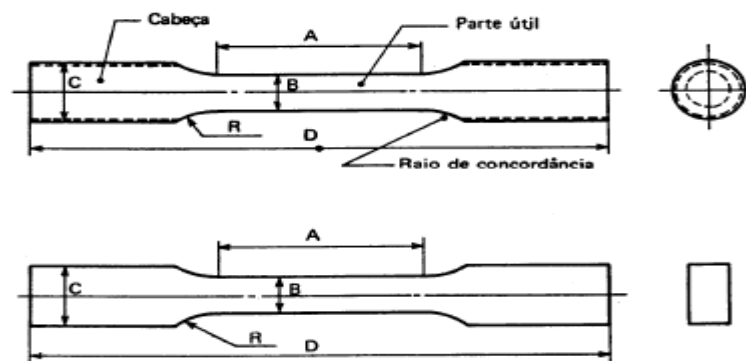
Fonte: MEYERS *et al*, 1999.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração devem ter características especificadas de acordo com as normas técnicas. Normalmente utilizam-se corpos de prova de seção circular ou retangular. O diâmetro padrão é de aproximadamente 12,8 mm, enquanto

o comprimento da seção reduzida deve ser pelo menos quatro vezes esse diâmetro, é comum ser de 60 mm (MOURA, 2016).

É constituído de cabeças e parte útil, unidas por concordância. As cabeças são as partes extremas, utilizadas para fixar o corpo de prova à máquina. A parte útil é a secção reduzida do corpo de prova onde acontece a ruptura; esta é a região onde serão feitas as diversas determinações.

**Figura 12-** Tipos mais usados de corpos de prova para ensaio de tração.

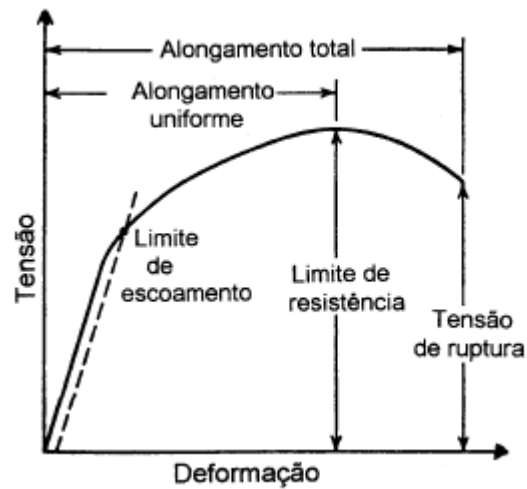


**Fonte:** SOUZA, 1982.

Embora a curva real seja mais precisa, a curva de engenharia é a mais utilizada. Através da curva de engenharia (vide Figura 13) pode-se definir vários parâmetros importantes:

- ✓ Limite de escoamento: é a tensão que separa o comportamento elástico do plástico. Como, em alguns casos, é difícil determinar-se a tensão máxima para a qual não há deformação residual plástica, define-se o limite de escoamento para uma deformação permanente de 0,2%.
- ✓ Limite de resistência: é a tensão (de engenharia) máxima que o corpo de prova resiste. A partir desta tensão, as tensões (de engenharia) caem, devido à estricção do corpo de prova.
- ✓ Tensão de ruptura: é a tensão (de engenharia) na qual ocorre ruptura.

**Figura 13-** Alguns parâmetros importantes definidos com auxílio da curva tensão versus deformação de engenharia.



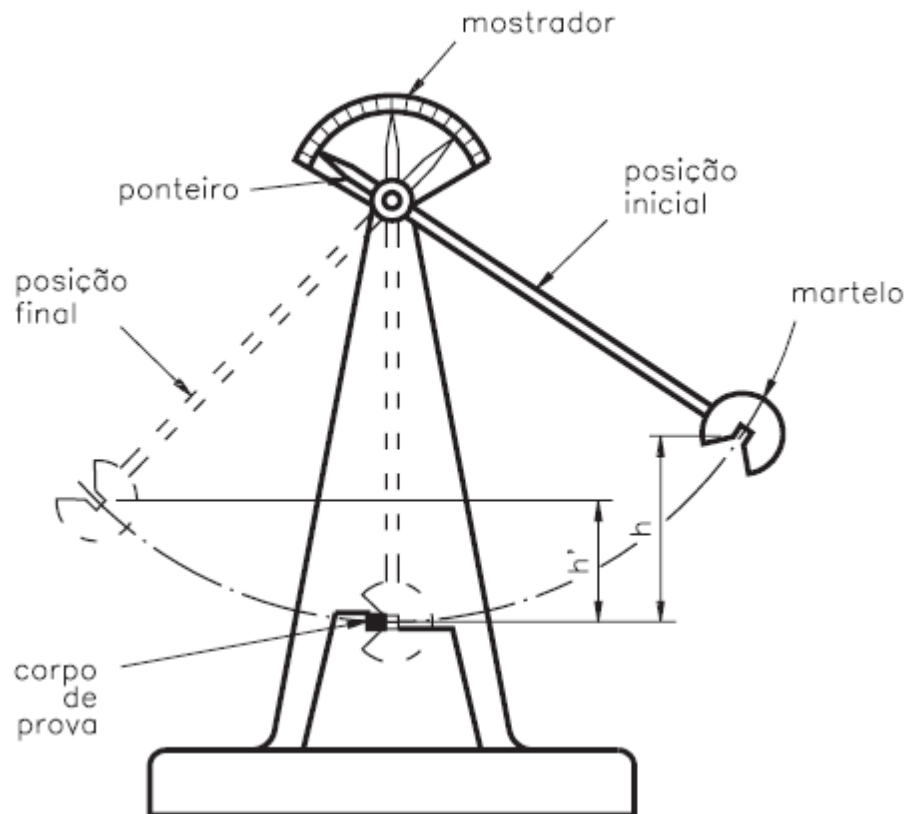
**Fonte:** DIETER, 1982.

Vale destacar que o ensaio de tração é realizado com a temperatura constante e que a velocidade de deformação (velocidade de afastamento das garras) é mantida aproximadamente constante. Este pode ser realizado tanto em temperaturas muito baixas como em altas temperaturas. Para a grande maioria das aplicações, o ensaio é realizado na temperatura ambiente.

### 3.6.2 Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado para a análise da fratura frágil de materiais. O resultado é simplesmente representado por uma medida de energia absorvida pelo corpo de prova, não fornecendo indicações seguras sobre o comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Entretanto, permite a observação de diferenças de comportamento entre materiais que não são observadas em um ensaio de tração. Na Figura abaixo tem-se a máquina para ensaio de impacto (GARCIA *et al*, 2012).

**Figura 14-** Equipamento para o ensaio de impacto.

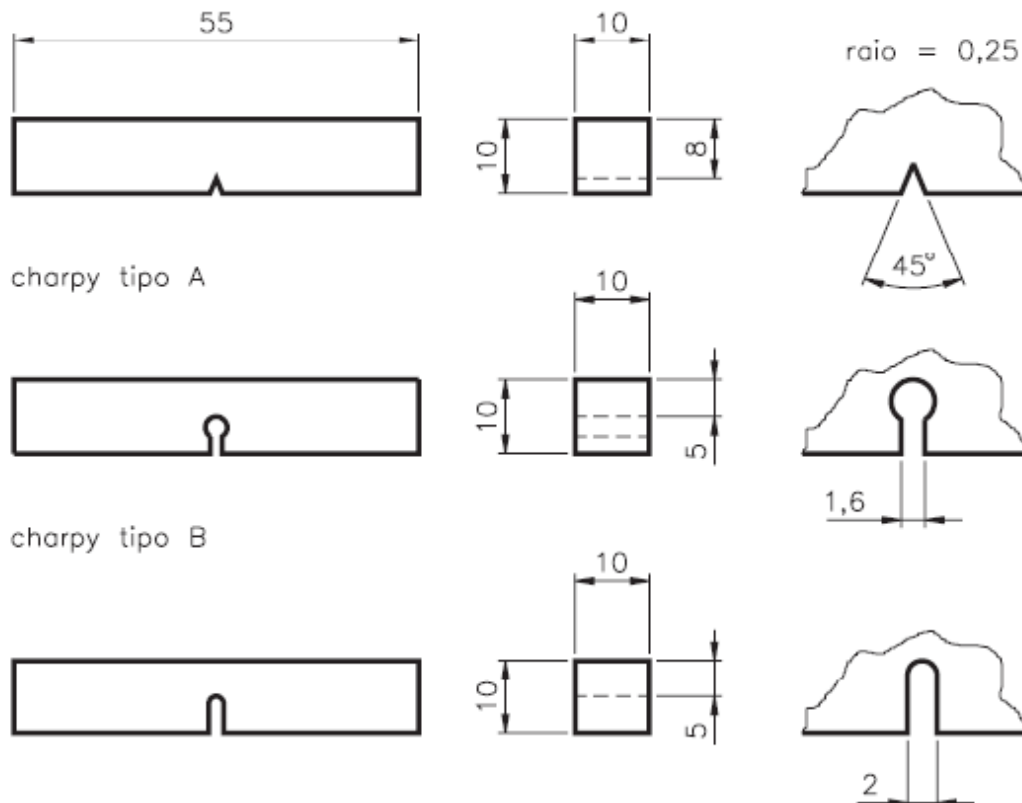


**Fonte:** ASTM, 1994.

A norma nacional recomendada para a realização de ensaio de impacto em materiais metálicos é a NBR 6157, que se aplica a corpos de prova entalhados simplesmente apoiados, em especial aços, e não se aplica a materiais com baixos valores de resistência ao impacto, como os ferros fundidos cinzentos. Os entalhes recomendados são em formato U ou V, com dimensões padronizadas, no meio do corpo de prova, e com plano de simetria perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova (GARCIA *et al*, 2012).

Dois tipos padronizados de ensaios de impacto são mais amplamente utilizados: *Charpy* e *Izod*. Em ambos os casos, o corpo de prova tem o formato de uma barra de seção transversal quadrada, na qual é usinado um entalhe em forma de V, U ou *key-hole*.

**Figura 15-** Tipos de corpos de prova *Charpy*.



Fonte: ASTM, 1994.

Os requisitos essenciais para a realização do ensaio são: corpo de prova padronizado, suporte rígido no qual o corpo de prova é apoiado ou engastado, pêndulo com massa conhecida solto de uma altura suficiente para fraturar totalmente o material e um dispositivo de escala para medir as alturas antes e depois do impacto do pêndulo. (GARCIA *et al*, 2012)

A forma mais frágil de fratura em materiais é a clivagem. Na clivagem, a propagação da trinca ocorre praticamente sem deformação plástica e a separação ocorre ao longo de planos cristalinos pelo rompimento das ligações químicas. A tendência à clivagem e à fratura frágil de um modo geral aumentam com o aumento da velocidade de deformação e com o abaixamento da temperatura de ensaio. Os resultados do ensaio de impacto são geralmente apresentados como a energia absorvida no processo de fratura do corpo de prova. A energia absorvida no processo de fratura varia muito com a temperatura de ensaio. Por esta razão são realizados ensaios em várias temperaturas. (PADILHA, 2000).

Através do ensaio e impacto pode-se medir (GARCIA *et al*, 2012):

- ✓ Energia absorvida: medida diretamente pela máquina;
- ✓ Contração lateral: quantidade de contração em cada lado do corpo de prova fraturado;

- ✓ Aparência da fratura: determinação da porcentagem de fratura frágil ocorrida durante o processo de ruptura por métodos como medida direta em função do aspecto da superfície de fratura, comparação com resultados de outros ensaios ou ensaios-padrão, ou através de fotografias da superfície e interpretação adequada.

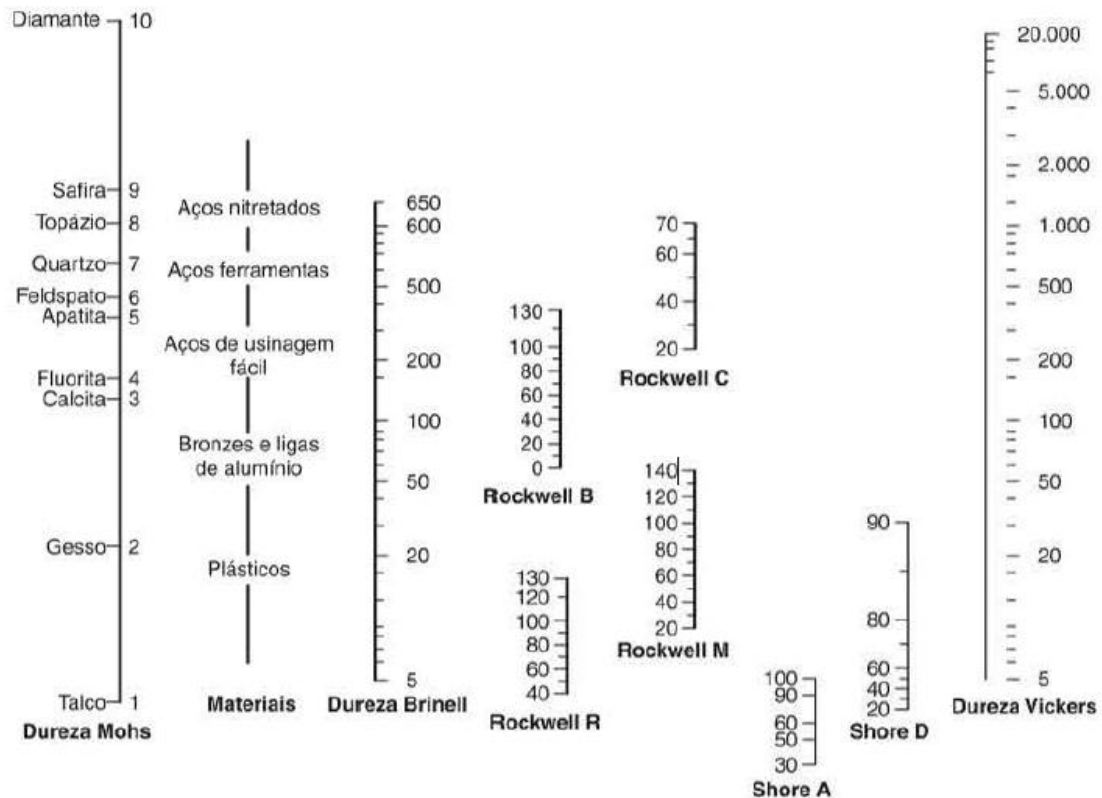
### 3.6.3 Ensaio de Dureza

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 e ensaios 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/ou carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica. A área da marca superficial formada ou a sua profundidade são medidas e correlacionadas a um valor numérico que representa a dureza do material. Essa correlação é baseada na tensão que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material. A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, do escorregamento de planos atômicos, assim como da resistência mecânica. (GARCIA *et al*, 2012).

Existem mais de uma dezena de ensaios de dureza. Estes ensaios podem ser classificados, conforme a maneira com que o ensaio é realizado, em três tipos: por penetração; por choque e por risco. A propósito, a escala de dureza mais antiga é a escala Mohs, introduzida em 1822, e é baseada na capacidade de um material riscar o outro. Em seguida serão apresentadas brevemente três ensaios de dureza: dureza Brinell, dureza Vickers e dureza Rockwell (PADILHA, 2000).



**Figura 16-** Escalas comparativas. dos valores para os vários métodos de durezas e aplicações recomendáveis para diversos materiais.

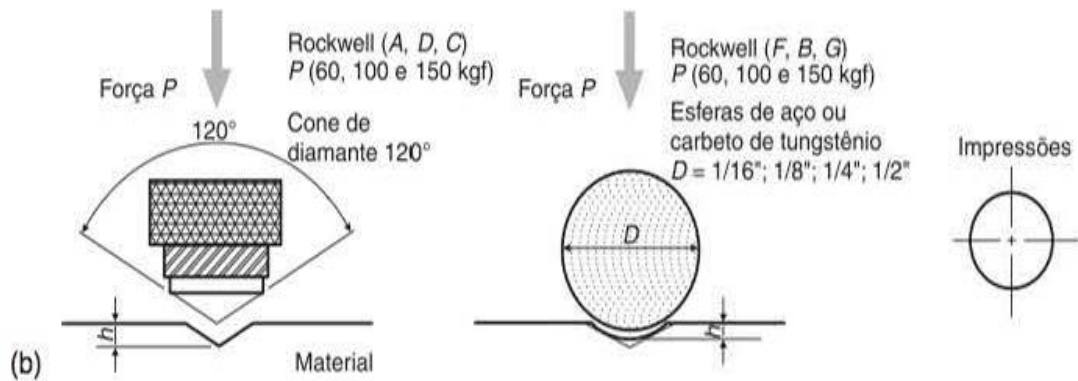


**Fonte:** GARCIA *et al*, 2012.

### 3.6.3.1 Dureza Rockwell

A escala Rockwell foi introduzida em 1922 por Rockwell. Este ensaio utiliza a profundidade de penetração, sob ação de uma carga constante, como medida de dureza. O ensaio é muito rápido, pois o resultado é lido automaticamente. Os penetradores são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (diamante com 120° de conicidade). Ao contrário das escalas Brinell e Vickers, a dureza Rockwell não tem unidade. Existem vários tipos de dureza Rockwell. Os mais utilizados são: Rockwell B (penetrador esférico,  $\lambda = 1,59$  mm, carga 100 kg) e Rockwell C (penetrador de diamante, carga 150 kg) (PADILHA, 2000).

**Figura 17-** Penetrador para a dureza Rockwell.



Fonte: GARCIA *et al*, 2012.

O teste de dureza Rockwell é bastante versátil e confiável; contudo, devem ser tomadas algumas precauções. A maioria das recomendações aplica-se também aos outros testes de dureza, conforme já foram descritas para a dureza Brinell.

A norma brasileira é a NBRNM-146-1:1998 (ABNT), e a norma internacional de maior utilização no país é a ASTM E18:2007 (ASTM).

Basicamente, o procedimento do ensaio consiste em:

- Escolha da escala (penetrador e cargas);
- Aplicação de pré-carga;
- Aplicação da carga principal por período específico;
- Retirada da carga principal e manutenção da pré-carga;
- Leitura da medida.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e procedimentos experimentais adotados no decorrer deste trabalho.

### 4.1 MATERIAIS

No presente trabalho as matérias primas utilizadas para a obtenção dos corpos de prova foram: alumínio, proveniente da ALBRÁS, com pureza de 99,7 a 99,9%, cobre oriundo de trocadores de calor e magnésio.

A tabela 1 apresenta as quantidades de cada matéria prima utilizada em peso, assim como as pressões aplicadas.

**Tabela 1-** Composições e pressões utilizadas nos lingotes da liga Al-Cu-Mg.

Formulações	Pressão Aplicada (MPa)	Alumínio (%)	Cobre (%)	Magnésio (%)
01	-	92	6	2
02	80	92	6	2
03	120	92	6	2
04	160	92	6	2

**Fonte:** Autor, 2018.

Os equipamentos utilizados durante todo o processo de obtenção da liga Al- Cu- Mg, assim como confecção dos lingotes e caracterização quanto a micro, macroestruturura e propriedades mecânicas estão relacionadas abaixo.

Acessórios e equipamentos para obtenção da liga e lingotes:

- ✓ Cadinho de carbetto de silício: modelo A 20 da Carbosil, revestido internamente com alumina em solução, para evitar contaminação do banho de metal líquido;

- ✓ Forno tipo LF9613, marca Jung Tecnologia para processos térmicos, temperatura máxima 1300°C, com interior revestido de manta refratária e controlador de processo tempo e temperatura;
- ✓ Forno tipo mufla, marca Elektro Therm Linn, temperatura máxima 1300°C, com interior revestido de placas refratárias e controle processado de temperatura;
- ✓ Balança analítica, marca Marte com precisão de três dígitos;
- ✓ Termopares: termopares de diâmetro ( $\approx 1,5$  mm) do tipo K para temperaturas de até 1200 °C.

A Figura 18 mostra alguns dos equipamentos utilizados no processo de produção dos lingotes.

**Figura 18-** (a) Cadinho de carbeto de silício e (b) Forno elétrico utilizado na fusão das ligas.



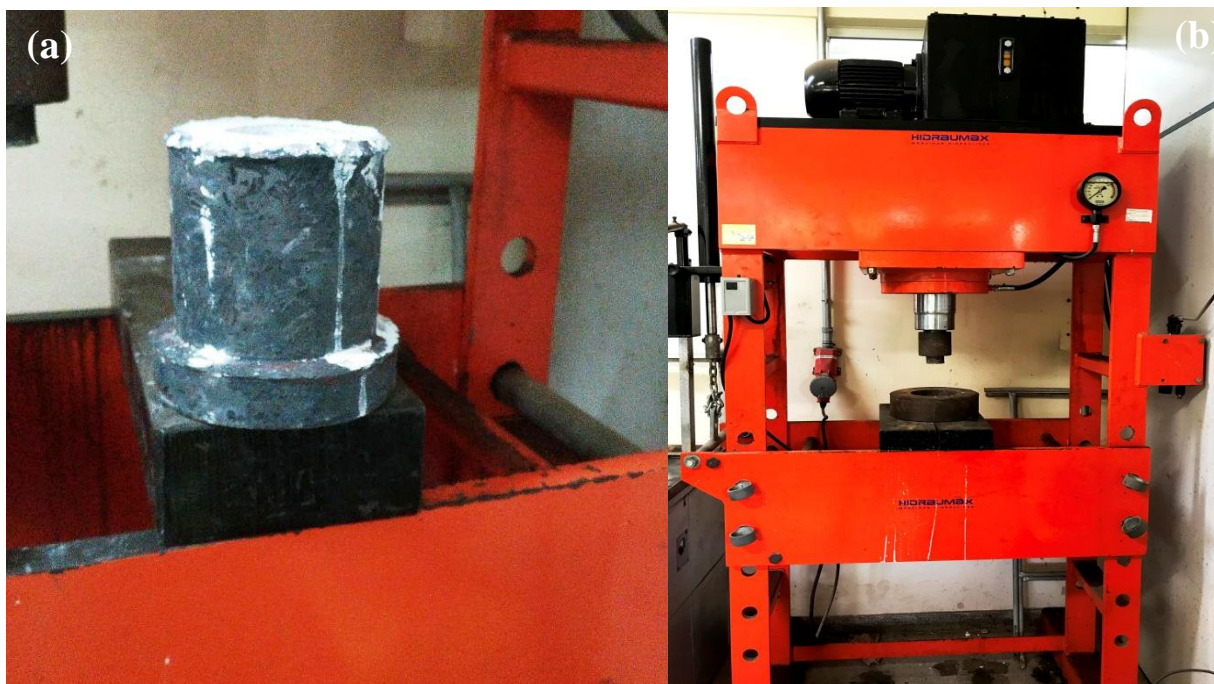
**Fonte:** Autor, 2018.

Utensílios Operacionais:

- ✓ Lingoteira de aço ASTM 1045 com diâmetro interno de 55 mm, altura de 145 mm e espessura de parede de 30 mm e uma base de fundo de aço 1020 com espessura de 50 mm;
- ✓ Prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas semi-automática da marca HIDRAUMAX.

A Figura 19 mostra a lingoteira utilizada, bem como a prensa hidráulica.

**Figura 19-** (a) Perfil da Lingoteira de aço 1045 e (b) Prensa hidráulica semi-automática utilizada.



Fonte: Autor, 2018.

Equipamentos utilizados para caracterização metalográfica, mecânica e química da liga (vide Figura 20) foram:

- ✓ Microscópio ótico marca OLYMPUS BX 51 com interface com um computador, utilizando uma placa de vídeo do tipo WIA/S3G. Em seguida as imagens foram capturadas e analisadas através do Software Motic Plus;
- ✓ Durômetro marca PANTEC com um penetrador tipo esfera para dureza Hockell (HRB);
- ✓ Máquina Universal de Ensaio Mecânico da marca Kratos utilizada para realização dos ensaios de tração;
- ✓ Máquina de impacto modelo JB- 300B, utilizando o SMAL PENDULUN com capacidade de medição de até 150 J;
- ✓ EDS( Espectoscopia de energia dispersiva) da marca Mics, modelo SwiftED 3000.



**Figura 20-** (a) Microscópio óptico com interface digital, (b) Microduromêtro (c), Máquina de Ensaio mecânicos e (d) EDS.



**Fonte:** Autor, 2018.

## 4.2 METODÓS

A metodologia para a realização deste trabalho está apresentada na Figura 21 que contém as etapas para a obtenção dos corpos de prova.

**Figura 21-** Fluxograma da metodologia adotada.



**Fonte:** Autor, 2018.

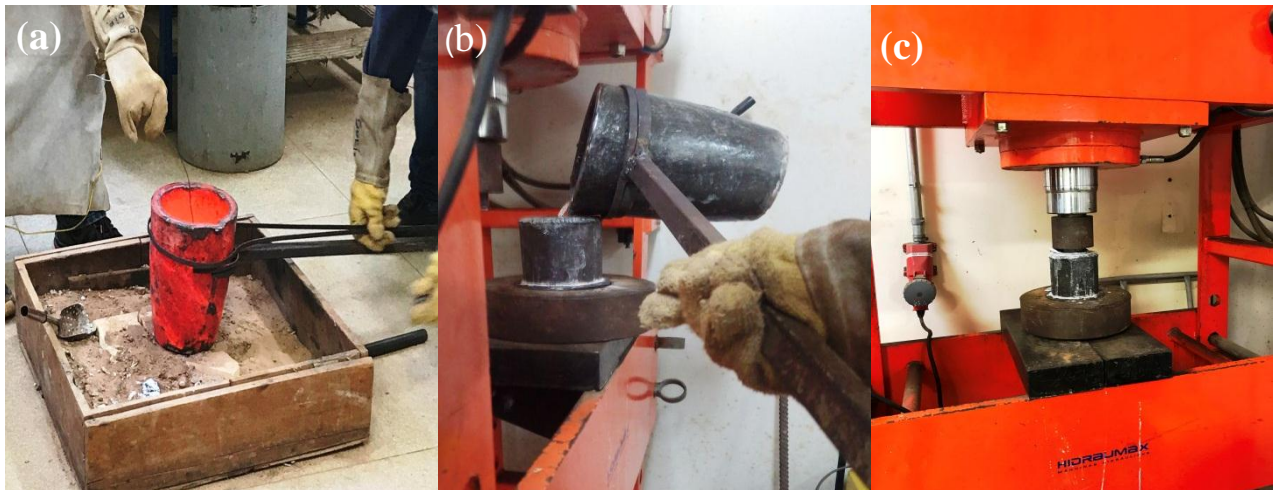
#### 4.2.1 Confeção dos lingotes

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizados estudos preliminares no intuito de saber a melhor porcentagem de cada elemento de liga, assim como as pressões adequadas de uso.

Inicialmente, foi realizado o ajuste da composição da liga Al-6%Cu-2%Mg, onde foi calculado a quantidade de massas dos três elementos que foram fundidos, o mesmo deu-se mediante o cálculo, levando em consideração a densidade de cada elemento, concentração de soluto da liga e volume total da liga.

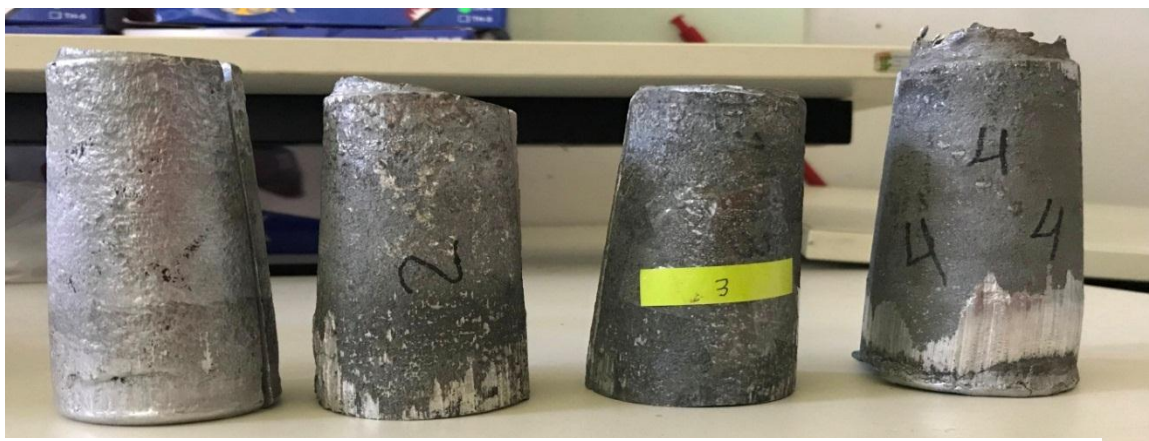
A obtenção da liga se deu a partir da fusão do alumínio em cadinhos revestidos de alumina para que não houvesse contaminação da liga em forno tipo mufla submetido a um superaquecimento  $850^{\circ}\text{C}$  para fornecer energia suficiente para a difusão do cobre e magnésio, a adição dos mesmos no banho de alumínio se deu fora do forno de fusão pelo fato do magnésio ser altamente reativo. Enquanto a liga estava homogeneizando, fez-se o aquecimento da lingoteira e punção com o auxílio de um maçarico: os mesmos obtiveram temperaturas de  $300$  e  $100^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Em seguida, a liga foi vazada na lingoteira a uma temperatura de  $690^{\circ}\text{C}$  sob a prensa onde foi executada a pressurização. A liga ficou sob pressão por 30 segundos. O controle da temperatura de todo o processo se deu por meio do auxílio do termopar (vide Figura 22). Após todo o processo os lingotes foram desmoldados da lingoteira, conforme mostra a Figura 23.

**Figura 22-** (a) controle da temperatura com auxílio de termopar, (b) vazamento da liga fundida e (c) aplicação da pressão na liga que se encontra na lingoteira.



Fonte: Autor, 2018.

**Figura 23-** Lingotes após serem desmoldados da lingoteira.



Fonte: Autor, 2018.



## 4.2.2 Metalografia

### 4.2.2.1 Macro e Micrografia

A partir do lingote solidificado, a preparação para a caracterização macro e microestrutural dos corpos de prova foram realizadas submetendo-os às técnicas metalográficas apropriadas.

Os lingotes solidificados foram seccionados em um plano médio (Figura 24), lixados com lixas d'água de granulação de 80 a 1200 meshes, polidas em politriz gotejada com pasta de diamante para polimento- de 9, 6, 3 e 1  $\mu$  e atacados com reagente químico Keller's (15 ml HF; 15 ml HNO<sub>3</sub>; 45 ml HCl e 25 ml H<sub>2</sub>O) para que a macro e microestrutura fossem reveladas.

**Figura 24-** Lingotes cortados ao meio longitudinalmente em ordem crescente de pressão (sem pressão, 80, 120 e 160 MPa).



Fonte: Autor, 2018.

**Figura 25-** (a) máquina politriz e (b) lixadeira.



Fonte: Autor, 2018

Para análise microestrutural, retirou-se uma amostra de cada lingote polido para então serem analisados no microscópio ótico, marca OLYMPUS BX 51 com interface a 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.

### **4.2.3 Composição Química**

Para a verificação da composição química qualitativa da liga foi realizada uma análise com uma amostra de cada formulação. As mesmas foram analisadas em um EDS (Espectrômetro de energia dispersiva) Modelo SwiftED3000 acoplado a um MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), Modelo HITACHI TM 3000.

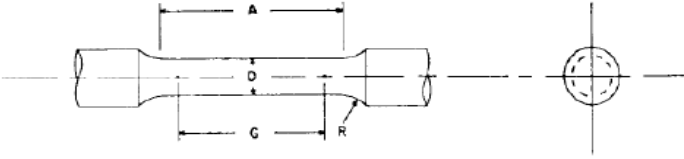
### **4.2.4 Propriedades Mecânicas**

No intuito de avaliar a resistência mecânica dos lingotes confeccionados realizou-se ensaios de tração, impacto e dureza.

#### **4.2.4.1 Ensaio de Tração**

Para a realização do ensaio de tração os lingotes que anteriormente já tinham sido cortados ao meio longitudinalmente foram cortados novamente ao meio, sendo assim para cada lingote foi confeccionado 4 corpos de prova. Os corpos de prova foram confeccionados por meio da técnica de usinagem (torneamento) em uma torneadora local, seguindo a norma ASTM E 8M, conforme mostrado na Figura 26.

**Figura 26-** Dimensões proporcionais do pino de leitura do teste de tração recomendado pela norma ASTM - E 8M – 03 Métrico, 2001. Em destaque, no quadrado, o utilizado no procedimento deste trabalho.



	Dimensão mm				
	Espécime padrão		Espécime proporcional ao padrão		
	12,5	9	6	4	2,5
G - Comprimento útil	62,5 ± 0,1	45,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	12,5 ± 0,1
D - Diâmetro	12,5 ± 0,2	9,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1
R - Raio do contorno	10	8	6	4	2
A - Comprimento da secção de redução	75	54	36	24	20

**Fonte:** ROOY, 1990

**Figura 27-** Corpos de prova utilizados no ensaio de tração conforme a norma ASTM E 8M.



**Fonte:** Autor, 2018.

Para o ensaio de tração, o corpo de prova foi posicionado inicialmente com folga na máquina e logo foi dada uma pré-carga para fixar a peça, depois de fixo na máquina o mesmo foi deformado por aplicação de carga. Esse processo pode ser visto na Figura 28.

**Figura 28-** Corpo de prova preso nas garras da máquina de ensaios.

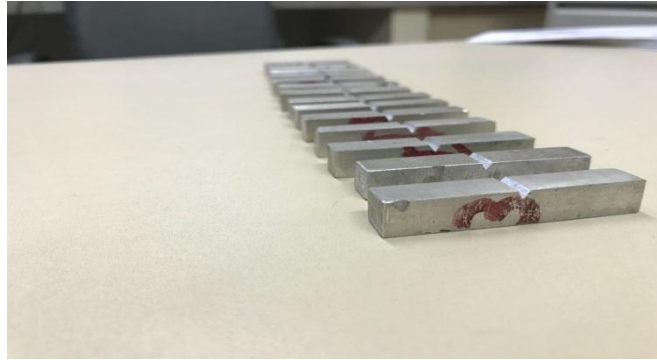


**Fonte:** Autor, 2018.

#### 4.2.4.2 Ensaio de impacto

Na análise de resistência ao impacto, optou-se em utilizar o corpo de prova Charpy tipo A (Figura 29). O corpo de prova foi confeccionado dentro das normas: um prisma retangular de base quadrada 10x10x55mm, com um chanfro de 2 mm. Os mesmos foram confeccionados através do processo de usinagem, levando em consideração que neste ensaio os resultados obtidos com vários corpos de prova de um mesmo metal são bastante diversos. Para chegar à resultados confiáveis a respeito do material ensaiado, foram utilizados cinco corpos de prova para cada uma das quatro pressões analisadas.

**Figura 29-** Corpos de prova utilizados.



**Fonte:** Autor, 2018.

A máquina de ensaio (Figura 30) utilizada foi uma máquina de impacto modelo JB-300B, utilizando o pêndulo pequeno com capacidade de medição de até 150 J, variação de 1 J e espaçamento de 40 mm na ferramenta de fixação dos corpos de prova.

**Figura 30-** Máquina de ensaio utilizada.



**Fonte:** Autor, 2018.

#### 4.2.4.3 Dureza Rockwell

Para este ensaio foram utilizadas 4 amostras, uma de cada pressão. Para a análise da dureza foi utilizado um durômetro da marca PANLEG, nas referências da escala de dureza Rockwell B conforme literatura. Em cada peça foi feito 9 ensaios, partindo da superfície de cada peça.



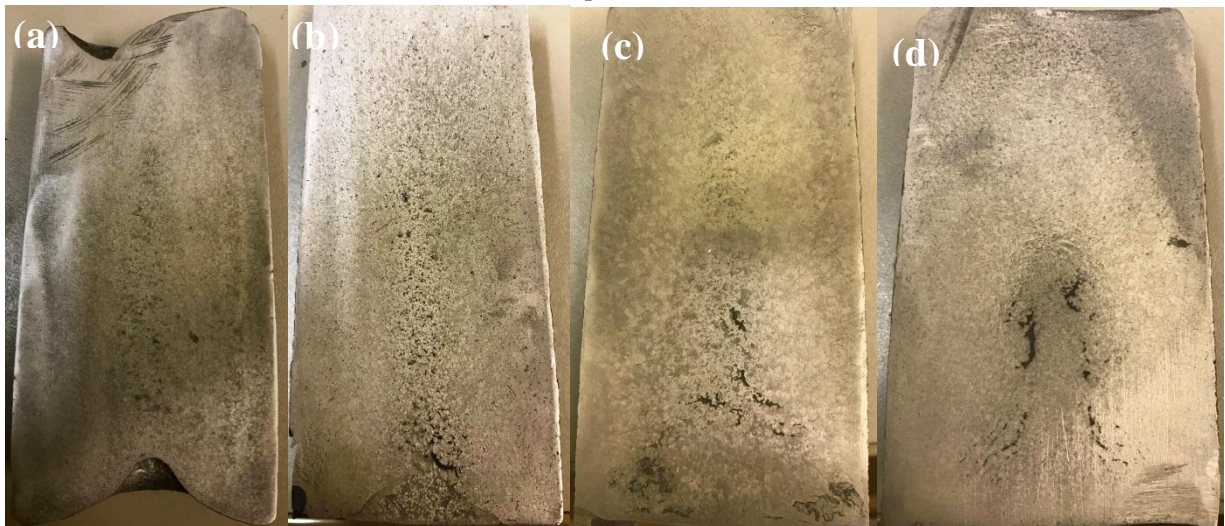
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 METALOGRAFIA

#### 5.1.1 Macrografia

A Figura 31 apresenta lingotes confeccionados a partir do processo *squeeze casting* com composição de Al-6%Cu-2%Mg. É de conhecimento que materiais obtidos através do processo de fundição sob pressão são isentos de defeitos, como, porosidades, macrossegregação e rechupes.

**Figura 31-** Macroestrutura da liga Al-6%Cu-2%Mg: a) sem pressão; b) 80 MPa; c) 120 MPa; d) 160 MPa. Ataque de Keller's..



**Fonte:** Autor, 2018.

A partir da Figura 31 pode-se verificar a predominância de grão equiaxiais em todos os lingotes, no lingote isento de aplicação de pressão observou-se a presença de grãos com maiores dimensões e mais grosseiros, além da presença de rechupe na base e no topo do mesmo, proveniente da contração volumétrica do metal após a solidificação

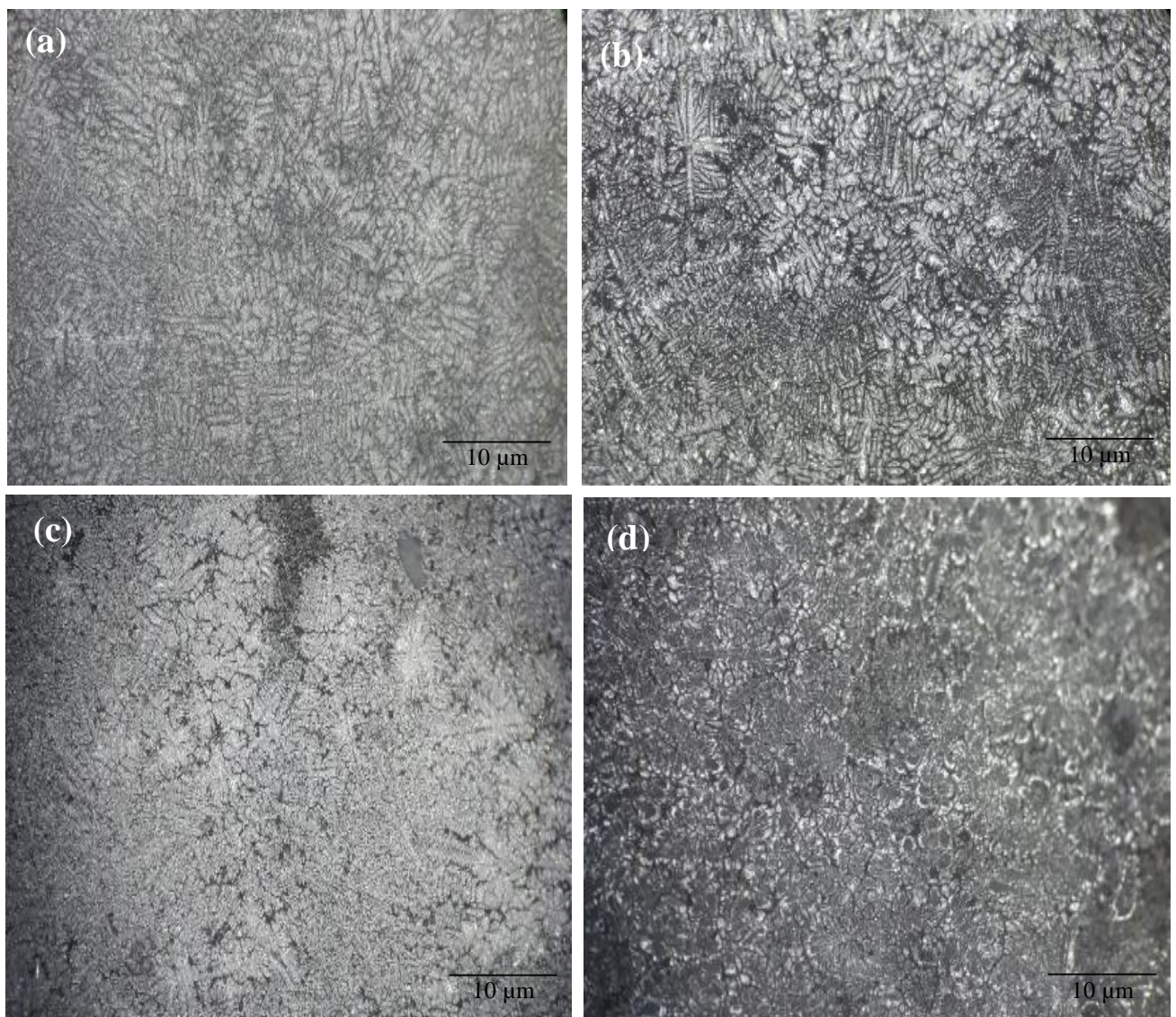
É notório o refinamento do grão com o aumento da pressão, entretanto, percebe-se que na macroestrutura a partir de 80 MPa apresenta vários pontos de macrossegregação. Tal fato é devido do movimento de líquido ou sólido que provoca a formação de uma composição química que difere da composição média (GARCIA, 2001).

Segundo Ferreira (1999), a macrossegregação pode ser evitada aumentando-se a temperatura da lingoteira ou diminuindo o tempo de espera para a aplicação da pressão.

### 5.1.2 Micrografia

A Figura 32 apresenta microestruturas óticas para a liga Al-6%Cu-2%Mg. É notório que o aumento da pressão originou microestruturas mais refinadas.

**Figura 32-** Microestrutura ótica da liga Al- 6%Cu-2%Mg: (a) sem pressão, (b) 80 MPa, (c) 120 MPa e (d)160 MPa.



**Fonte:** Autor, 2018.

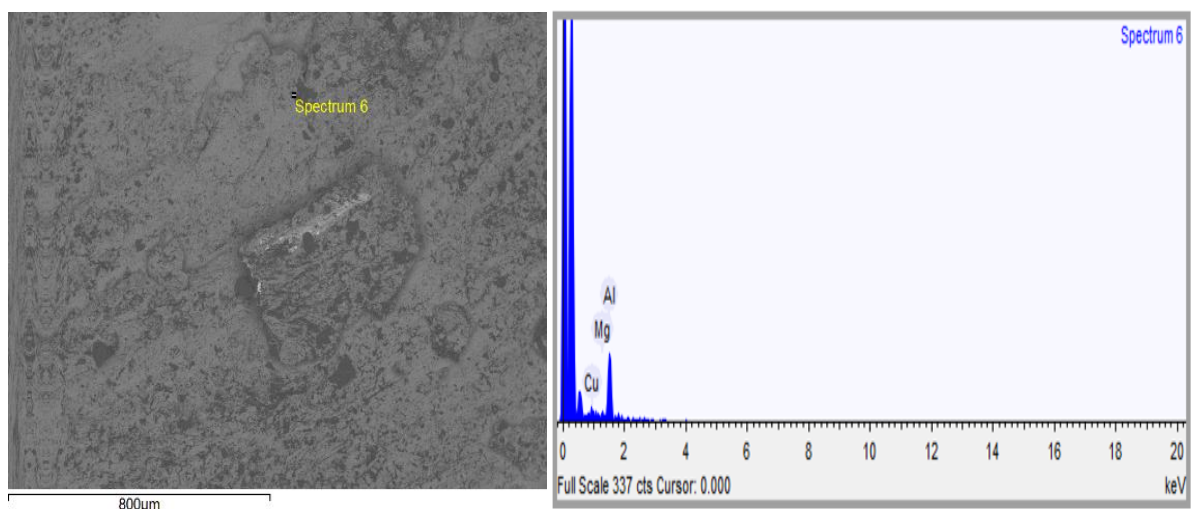
É possível constatar através da análise das microestruturas da Figura 32, que houve a presença de dendritas, como esperado, pois é uma característica de materiais fundidos. Entretanto, não houve predominância dessa microestrutura, pois segundo Skolianos *et. al*, (1997), em geral o número de dendritas e o espaçamento interdendrítico de peças fundidas sob pressão são menores. Sendo assim, com o aumento da pressão teve-se uma diminuição do espaçamento dendrítico.

Vale ressaltar que as 4 microestruturas apresentadas na Figura 32, são isentas de poros, característica esta comum no processo *squeeze casting* e em ligas contendo cobre, pois, segundo Molinari, (1997), o cobre diminui a solubilidade do hidrogênio, um dos principais geradores de bolhas e porosidades na estrutura do material.

## 5.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

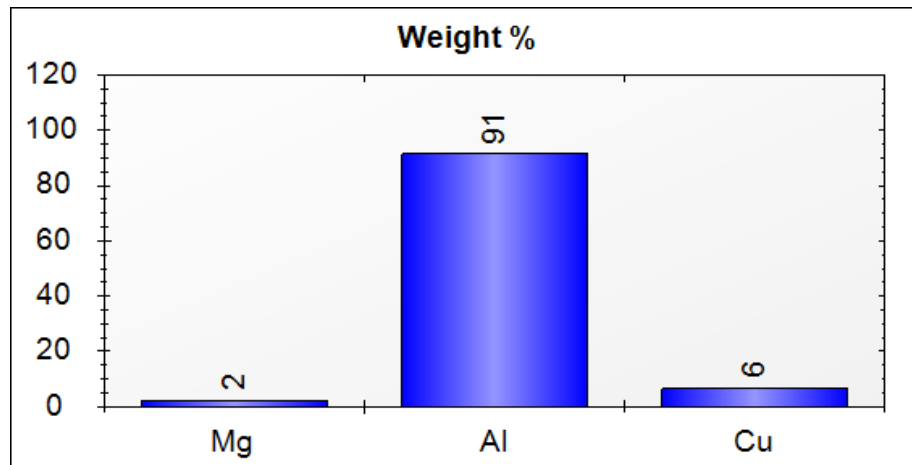
Após realizar a análise em diferentes pontos de cada lingote, observou-se que a composição da liga estava em conformidade para todos os percentuais apresentados. Como esperado, a mesma possuía Al-6%Cu-2%Mg, conforme as Figuras 33 e 34.

**Figura 33-** a) Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-1%Mg e (b) espectrômetro da mesma.



**Fonte:** Autor, 2018.



**Figura 34-** Composição média da liga Al- 6%Cu- 2%Mg.

**Fonte:** Autor, 2018.

A tabela 2 apresenta a média dos percentuais dos elementos presentes na liga.

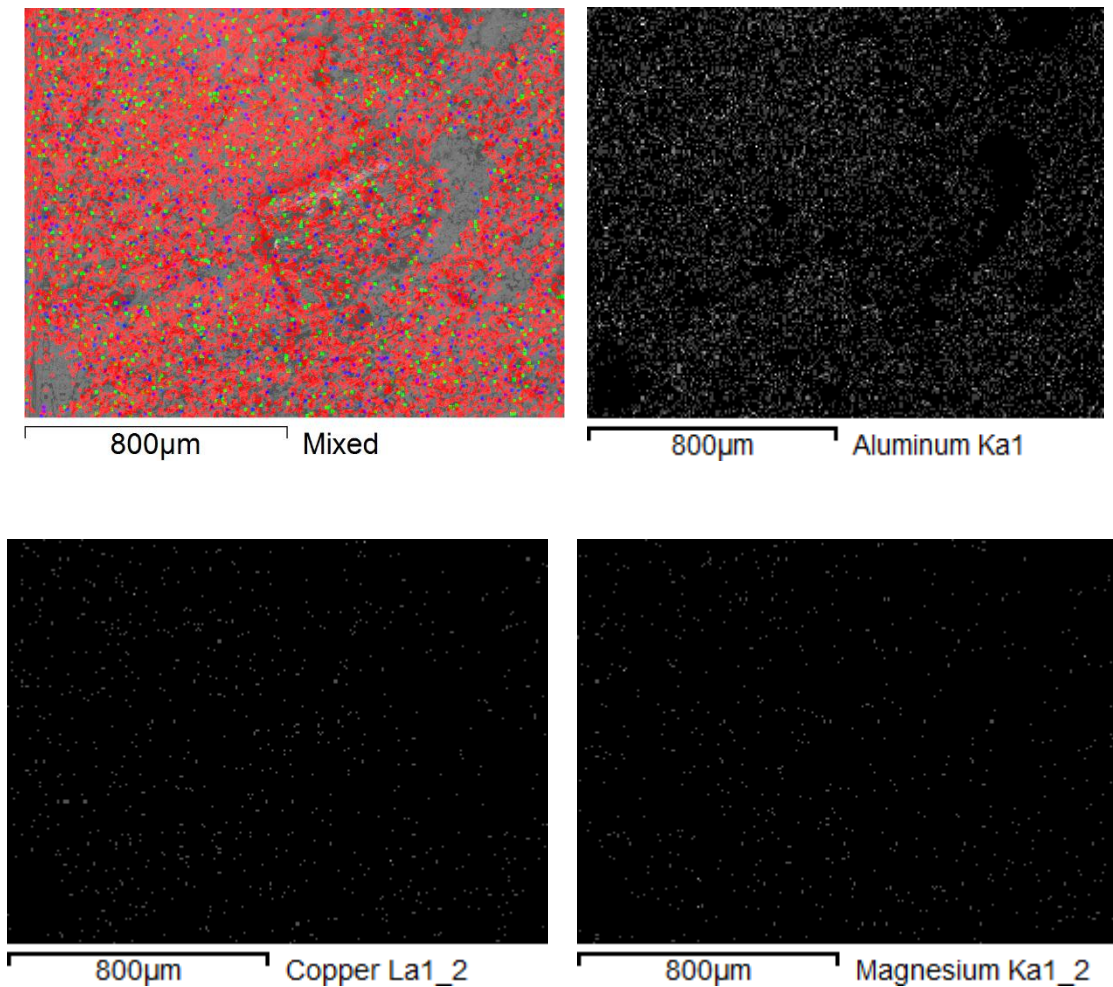
**Tabela 2-** Média dos percentuais dos elementos de liga Al- 6%Cu-2%Mg.

Element	Peso %	Peso % $\sigma$	Atômico %
Magnésio	2.098	2.906	2.411
Alumínio	91.509	6.903	94.777
Cobre	6.393	6.485	2.812

**Fonte:** Autor, 2018.

Na Figura 35 observa-se a distribuição no material dos elementos presentes na liga, pode-se inferir que os mesmos apresentam uma distribuição homogênea comparada a cada porcentagem que se tem destes na liga Al-6%Cu-2%Mg.

**Figura 35-**(a) Mapa de distribuição de elementos presentes na liga (vermelho) Alumínio, (azul) Magnésio, (verde) cobre, (b) Distribuição do Alumínio, (c) Distribuição do cobre e (d) Distribuição do Magnésio.



Fonte: Autor, 2018.

### 5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

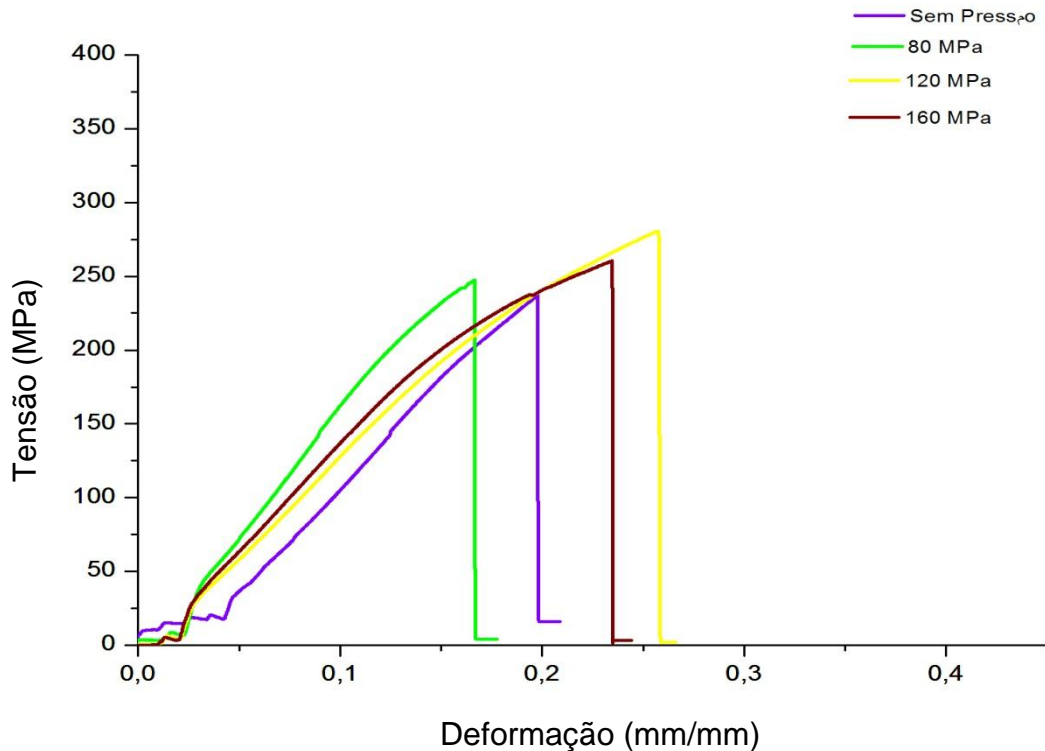
#### 5.3.1 Ensaio de Tração

O gráfico da Figura 36 mostra os resultados obtidos através do Ensaio de tração que determinou o limite de resistência a tração (LRT) para as amostras sem pressão e com variação na aplicação de pressão, obtidas através do processo *Squeeze Casting*. Observa-se a evolução dos valores da LRT em função do aumento da pressão, atingindo um patamar em torno de 300 MPa para pressão de 120MPa.

Quando se compara a variação da resistência a tração do lingote sem pressão com o de 120MPa, percebe-se que este último apresentou um aumento de 24%. Pode-se presumir que a

pressão tem um efeito satisfatório no que tange a resistência mecânica. Entretanto, só teve aumento até 120 MPa, pois de acordo com a literatura a pressão só tem efeito quando aplicada de 50 e 150 MPa. Observou-se uma igualdade do limite de resistência a tração da liga quando comparada com outras ligas da mesma série.

**Figura 36-** Comparação das curvas tensão x deformação.

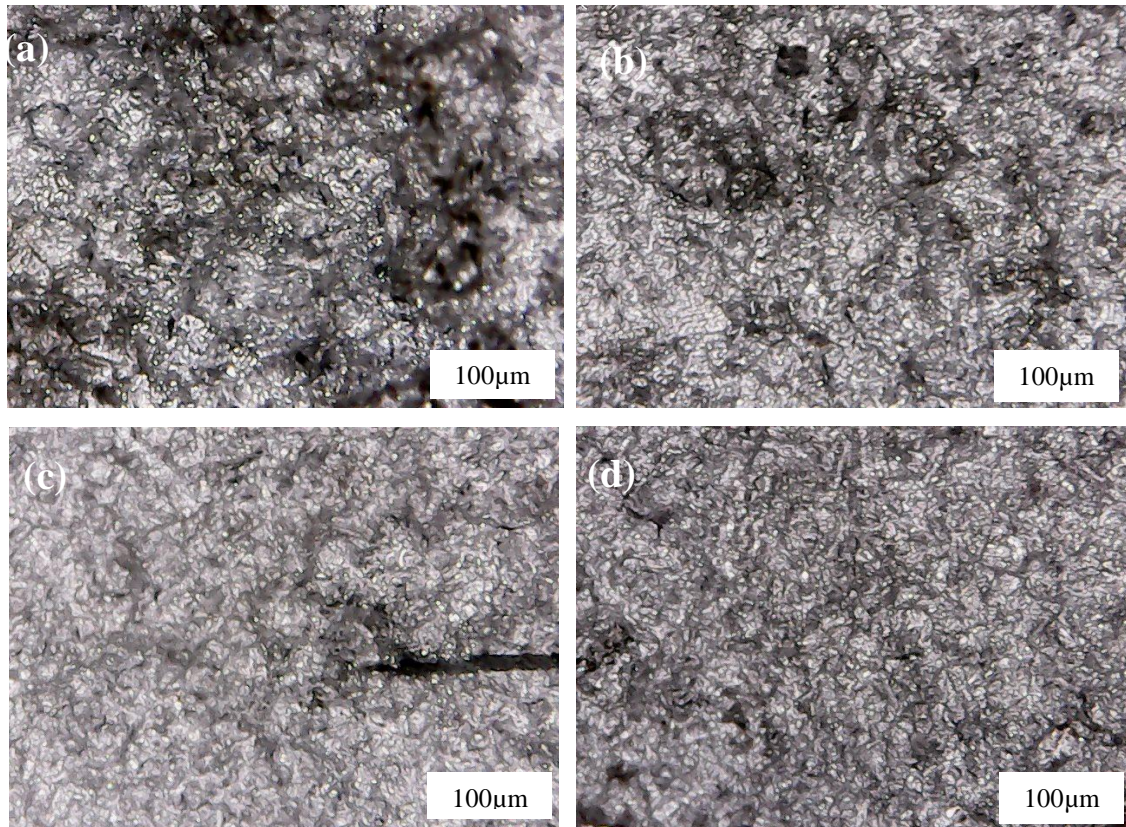


**Fonte:** Autor, 2018.

### 5.3.1.1 Fractografia

Analisando a Figura 37, percebe-se que a fratura apresentada após o ensaio de tração nos corpos de prova da liga foi totalmente frágil. Este tipo de fratura apresenta uma zona plástica muito pequena ou nula, com pequena deformação plástica e após atingir a máxima carga, o material rompe-se de maneira transgranular ou granularmente com estricção mínima ou nula. As fraturas apresentaram aspecto cristalino brilhante característico da fratura frágil e o rompimento dos corpos de prova deu-se de forma planar, com presença de migrossegregações.

**Figura 37-** Face de fratura dos corpos de prova tracionados. (a) Sem pressão, (b) 80 MPa, (c) 120 MPa e (d) 160 MPa.



**Fonte:** Autor, 2018.

Foi evidente que o aumento da pressão favorece a diminuição dos pontos de microsegregação nos lingotes.

### 5.3.2 Ensaio de Dureza

A Tabela 3 apresenta os valores de dureza para todas as pressões utilizadas. Observa-se que a amostra sem pressão foi a que apresentou maior dureza, 82,58HB. .

Segundo Maleki *et. al.* (2006), mantendo-se a variável pressão constante e variando-se a temperatura da lingoteira e a temperatura de vazamento do metal, esta primeira exerce maior influência na microdureza de ligas metálicas produzidas via processo *Squeeze Casting*. Sendo assim, percebe-se que a pressão não influenciou no aumento da dureza.

**Tabela 3-** Valores de dureza e média da dureza Rockell B(HRB) e seu valor estimado em Brinell(HB).

	<b>Squeeze Casting</b>			
	<b>Sem Pressão</b>	<b>80 MPa</b>	<b>120 MPa</b>	<b>160 MPa</b>
<b>1</b>	46,5	41,7	37,4	39,8
<b>2</b>	53,5	44,4	35,4	40,7
<b>3</b>	51,7	42,5	39,2	39,3
<b>4</b>	54,5	42,9	36,8	42,4
<b>5</b>	48,9	43,1	35,5	42,8
<b>6</b>	51,2	37,4	37,3	42,3
<b>7</b>	47,5	40,9	33,8	40,9
<b>8</b>	45,8	38,2	35,1	39,5
<b>9</b>	53,9	44,9	37,2	40,2
<b>Média (HRB)</b>	50,39	41,78	36,41	40,96
<b>Média (HB)</b>	82,58	75,77	71,12	74,96
<b>Desvio Padrão</b>	3,13	2,57	1,61	1,33

**Fonte:** Autor, 2018.

### 5.3.3 Ensaio de Impacto

Através do ensaio de impacto pode-se obter a resistência ao impacto, conforme mostra a tabela 4.

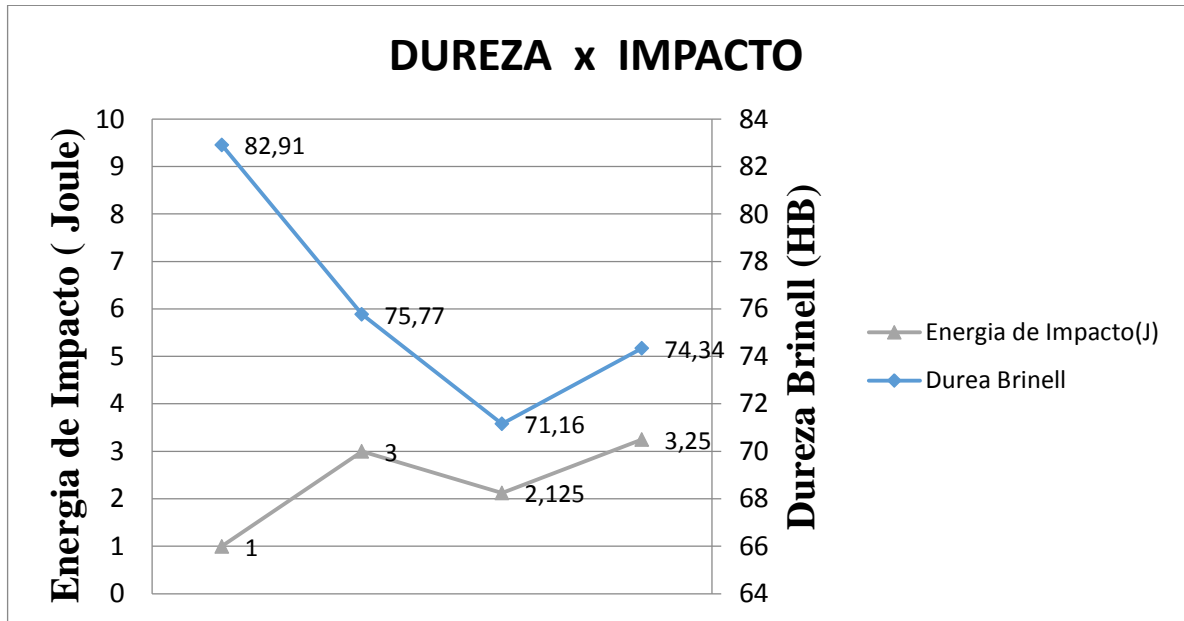
**Tabela 4-** Médias de resistência ao impacto para cada condição.

<b>Resistência ao Impacto (KJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Squeeze Casting</b>			
	<b>Sem Pressão</b>	<b>80 MPa</b>	<b>120 MPa</b>	<b>160 MPa</b>
	12,5	37,5	26,7	40,6

**Fonte:** Autor, 2018.

Percebe-se que o menor valor de resistência ao impacto foi da amostra sem pressão, a mesma apresenta resistência de 12,5 KJ/m<sup>2</sup>. Quando comparado com os valores de dureza, percebe-se que os mesmos são inversamente proporcionais, conforme mostra a literatura. À medida que a dureza aumenta a resistência ao impacto diminui, conforme a Figura 38.

**Figura 38-** Gráfico de Dureza x Impacto.



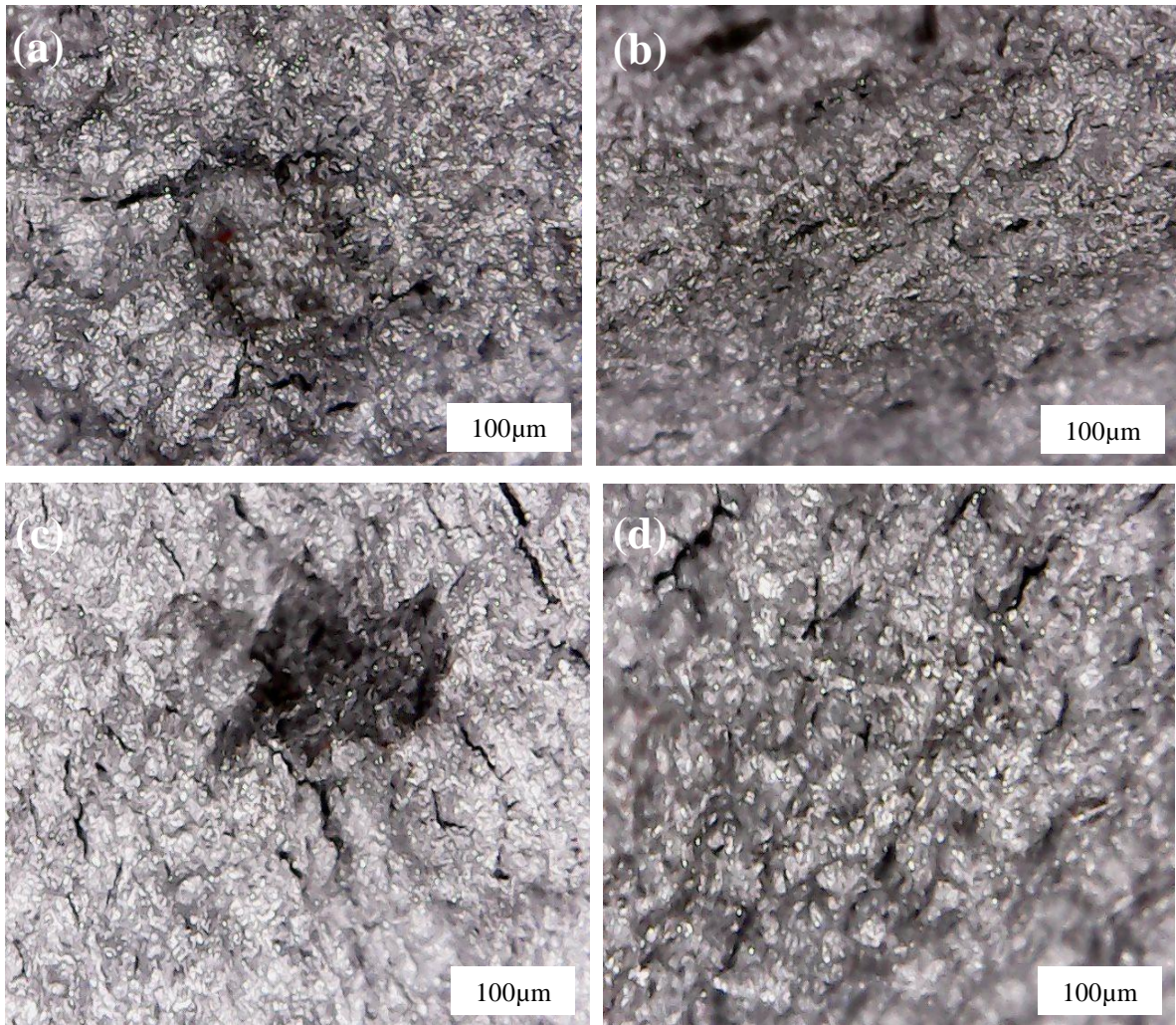
**Fonte:** Autor, 2018.

### 5.3.3.1 Fractografia

A partir da análise das fractografias da Figura 39, provenientes do ensaio de impacto, percebe-se que as mesmas tiveram um comportamento frágil, foi notória a presença de fratura intergranular nas amostras.



**Figura 39-** Fractografia dos corpos de prova obtidas através do ensaio de impacto, (a) sem pressão, (b) 80 MPa, (c) 120 MPa e (d) 160 MPa.



**Fonte:** Autor, 2018.

## 6 CONCLUSÕES

A partir da observância dos resultados obtidos através da análise macro e microestrutural, dos ensaios de tração, impacto e dureza, pode-se concluir que:

### 6.1 ASPECTO MACRO E MICROESTRUTURAL

A medida que aumentou a pressão, percebeu-se um refinamento dos grãos, a macroestrutura apresentou comportamento preferencialmente equiaxial. A pressão exerceu influência na eliminação de defeitos de fundição, tais como, rechupes, porosidades, bolhas e defeitos de Shrinkage. Entretanto, observou-se uma discreta presença de microsegregações, estas provenientes respectivamente de elementos exógenos devido ao uso de cadinhos de carvão de silício, e a forte tendência de oxidação de ligas de Al – Cu - Mg somado à contração característica do alumínio, o que proporciona o maior surgimento de micro defeitos de fundição. As microestruturas observadas apresentaram a formação de dendritas. Percebeu-se visualmente que as dendritas com o aumento da pressão, apresentaram um menor espaçamento, melhorando assim a resistência mecânica.

### 6.2 ANÁLISE DO LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E DUREZA

Quanto ao ensaio de tração observou-se um aumento do limite de resistência a tração em pressões aplicadas até 120 MPa, esta apresentou um tensão máxima de 300 MPa. Em relação à amostra sem pressão, teve-se um aumento de 24%, presume-se então que a pressão tem efeito satisfatório no que tange a resistência mecânica. Em relação à dureza foi observado valores entre 71 e 82 HB, o que indica que a liga trabalhada apresentou uma alta dureza e pouca ductilidade. O efeito da pressão foi relativamente baixo, evidenciando-se assim uma variação não uniforme dos valores de dureza com o aumento da pressão.

### 6.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A energia absorvida dos corpos de prova da liga Al-Cu-Mg apresentou uma forte variação, a maior energia absorvida foi dos corpos de prova que foram submetidos a pressões de 160 MPa, os mesmos apresentaram uma média de 40,6 KJ/m<sup>2</sup>. Sendo assim, pode-se inferir que a pressão influenciou nos resultados de energia absorvida através do ensaio de impacto.



## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- ✓ Analisar o efeito do tratamento térmico sobre a morfologia e propriedades mecânicas da liga ternária Al-Cu-Mg;
- ✓ Avaliar o espaçamento dendrítico, assim como sua influência na microestrutura e nas propriedades mecânicas de outras ligas de alumínio;
- ✓ Verificar os parâmetros de solidificação em ligas dos sistema Al-Cu-Mg;
- ✓ Analisar a adição de outros elementos de liga no alumínio, verificando suas propriedades mecânicas e morfológicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. ABAL. São Paulo, 2012.

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. ABAL. São Paulo, 2014.

ALMEIDA, D.T.; **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) da liga de alumínio 5182-O**. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), UFRS. Porto Alegre, 2015.

**ALUMÍNIO E SUAS LIGAS**, Disponível em: ><http://spectru.com.br/Metalurgia/diversos/alumínio%5B1%5D.pdf>>;2013 . Acessado em outubro de 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. **Properties and selection: nonferrous alloys and special- purpose materials**, V.2, ASM, 1992.

ASM SPECIALTY HANDBOOK. **Aluminum and aluminum alloys**. United States Of America ASM INTERNATIONAL 1993.

ASM - INTERNATIONAL, “**Stress corrosion cracking of aluminum alloys**”, v. 13, cap. 8, p. 233, 1992.

ASTM Standard E 23-94a - **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 1994.

CAMPOS FILHO, M. P. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978.

CALLISTER, W.Jr., “**Ciência e engenharia de Materiais: um introdução**” – 5ª edição, LTC 2002.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica** . Volume III, 2ª Edição, 1986.

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

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

**EUROPEAN ALUMINIUM** Association, Annual Report 2011 – Activity Report, disponível em [www.eaa.net/en/publications/annual-report](http://www.eaa.net/en/publications/annual-report) (acedido em Maio de 2012)

FARIA, J. D. **Correlações entre variáveis térmicas, microestrutura e propriedades mecânicas das ligas Al-4%Cu e Al-4%Cu-4%Ag solidificadas em regime transitório**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

FERREIRA, M.G.S.; FERNANDES, J.C.S., **Corrosão atmosférica do alumínio**. In **Corrosão Atmosférica: Mapas de Portugal**, Editores Almeida, E.M.; Ferreira, M.G.S, INETI, Lisboa (1997) 87-98.

FERRARESI. D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Edgard Blucher, São Carlos, 1969.

FIGUEIREDO, A. P. **Análise Da Solidificação De Ligas De Magnésio Para Aplicação Na Fabricação De Motores. 2008. 141 f.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre.

FUOCO, R. “**Fundição de ligas de alumínio**”, IPT, São Paulo, Novembro 2001.

GARCIA, A., SPIM, A.J., SANTOS, C.A, **Ensaio dos Materiais**. - 2º Edição, LTC 2012.

GARCIA, A., SPIM, A.J., SANTOS, C.A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GHOMASHCHI, M., and VIKHROV, A., “**Squeeze casting: an overview**”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 101, pp. 1–9, 2000.

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

LEE, C.; SEE, D., “**Modeling Microporosity in Aluminium- Silicon Alloys: a review**”, Journal of Light Metals, V. 1, pp. 15-30, 2001.

MALAVAZZI, J. “**Fundição do Alumínio**”, São Paulo, 2002.

MALEKI, A. et al. **Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM 13 alloy. IN: Materials Science & Engineering. 2006. p. 135-140. M. Ghomashchi and A. Vikhrov, “Squeeze casting: an overview**”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 101, pp. 1–9, 2000.

METALS HANDBOOK; **Alloy phase diagrams**,v.3. Ed. United States Of America: ASM International, p. 238, 1992.

MOLINARI, M. “**Ligas de alumínio para fundição e influência dos elementos de liga e impurezas**”. Joinville 1997.

MONDOLFO, L.F.; **Aluminum alloys: structure and properties**. Butterworths. London, 1976.

MOURA, J. A., **Atributos do Alumínio na Arquitetura**. Disponível em <[jorgeantoniomagalhaesmoura.blogspot.com.br/2012/11/atributos-do-aluminio-na-arquitetura](http://jorgeantoniomagalhaesmoura.blogspot.com.br/2012/11/atributos-do-aluminio-na-arquitetura)>. Acesso dezembro 2016.

PINHEIRO, L. B. L. G. **Ensaio de Materiais; Tecnologia dos Materiais II**, 23 de setembro de 2010.

ROOY, E. L., **Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys**, IN.: American Society for Metals: ASTM HandBook, vol 2- Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials, 10<sup>a</sup> edition, pp. 17-39, 1990.

SANTOS, E.R. **Estudo das Variáveis Térmicas na Solidificação e Difusividade do Alumínio e Ligas Al-Cu**, 2007. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Tecnologia e Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

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

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

SMITH, W. F. **Princípios de ciências e engenharia de materiais**. 2Ed. Portugal: Mcgraw-Hill, 1998.

YUE, T. M. and CHADWICK. G. A., “**Squeeze casting of light alloys and their composites**”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 58, no. 2–3, pp. 302–307, Mar. 1996.