



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

ANTONIO CHARLES CAVALCANTE BARBOSA

**ANALISE DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E MICROESTRUTURAL DA LIGA
(Al/Cu), COM ADIÇÃO DE Mg, UTILIZANDO O PROCESSO DE SQUEEZE
CASTING**

MARABÁ

2017



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

ANTONIO CHARLES CAVALCANTE BARBOSA

**ANALISE DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E MICROESTRUTURAL DA LIGA
(Al/Cu), COM ADIÇÃO DE Mg, UTILIZANDO O PROCESSO DE SQUEEZE
CASTING.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais, Campus de Marabá, Universidade
Federal do Sul e Sudeste do Pará.

Orientador: Prof. Márcio Paulo de Araújo.Mafra

ANTONIO CHARLES CAVALCANTE BARBOSA

**ANALISE DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E MICROESTRUTURAL DA LIGA
(Al/Cu), COM ADIÇÃO DE Mg, UTILIZANDO O PROCESSO DE SQUEEZE
CASTING.**

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

DATA DA AVALIAÇÃO: ____/____/____

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eng. Márcio Paulo de Araújo. Mafra
(FEMAT- IGE- UNIFESPA- Orientador)

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Silva
(FEMAT- IGE- UNIFESPA- Membro)

Prof. Dr. Márcio Corrêa de Carvalho
(FEMAT- IGE- UNIFESPA- Membro)

Com Amor,

*Aos meus pais, Maria de Nazaré Oliveira Cavalcante e Nazareno de Lima Barbosa e a minhas irmãs Creuza, Carmem, Márcia, Patricia ao meu irmão Ivanilson e todos os meus sobrinhos(as) e In Memory de Meus Avós **Jaime Cavalcante** e **Aláide Cavalcante**.*

DEDICATÓRIA

A Deus meu primeiro e maior dos agradecimentos, por sempre ter me iluminado e me dado forças dia após dia para nunca desistir e sempre transpor os momentos difíceis.

Aos meus pais que jamais mediram esforços para a realização deste sonho, por apoiarem sempre meus estudos, planos e escolhas. Por estarem sempre junto a mim cada um a sua maneira, essa conquista é dedicada especialmente a vocês, meus principais pilares de sustentação.

A minhas irmãs Creuza, Carmem, Márcia, Patricia, e a meu irmão Ivan e a todos sobrinhos (as), por serem inspiração e esperança nos momentos difíceis;

Ao professor e Amigo Márcio Mafra, que aceitou o desafio de fomentação deste trabalho e que em nenhum momento mediu esforços para a concretização deste; Seu acreditar em meu potencial fez-me mais forte mesmo quando muitos esvaíram-se.

A Dn^a. Francisca Pereira por desde o início deste sonho estar ao meu lado

A Família Silva nas pessoas do Sr. Raimundo e Dn^a. Auxiliadora e seus filhos Fábio e Bruno por me acolherem em seu lar e fazer deste meu também tratando-me como filho.

Ao amigo Gilberto e Esposa Débora (Brigona), pelo apoio e por todos os momentos bons de convivência.

A família Ramos nas pessoas do Sr. Felipe e Dn^a Eunice e a seus filhos.

A todos da família Miranda em especial Aline e Marcos, Arthur e Celine.

A família DVD, por todos os momentos de felicidade.

A minha grande Amiga, Leidiane Silva por sempre me incentivar e apoiar-me nos contratempos enfrentados e por todas palavras de apoio proferidas, e que com uma simples brincadeira e sorriso eram luz para continuar e concluir este sonho.

AGRADECIMENTOS

Diversas pessoas, de diferentes maneiras e em diferentes oportunidades, contribuíram para a realização desse trabalho.

Agradeço de modo especial à minha mãe Maria e meu pai Nazareno, pela dedicação a mim, e apoio nos momentos mais difíceis da minha graduação.

Ao professor Marcio Paulo de Araújo Mafra pela orientação e pelo apoio durante esse trabalho, pelas contribuições inestimáveis ao qual levarei pelo resto de minha vida... Uma pessoa que tenho como irmão mais velho.

Agradeço aos meus amigos da FEMAT, Sorato, Danilo, Bruno, pela ajuda e contribuição no desenvolvimento desse trabalho sem vocês este não seria realidade, tenho vocês como irmãos.

A todos amigos que sempre me apoiaram: Charles, Renan, Torbem, Jailes, Pedro, Gleisson, Lázaro Noletto, Adielson, Alex Dias, Wilker e Elton e as amigas Kaline, Lorena, Amanda, Paula, Nayara, Priscila, Juliene, Gabi, Samara Dayane, Hilbenária e Camila por desde o início dessa difícil jornada sempre estiveram presentes me ajudando em todos os aspectos dentro e fora de sala de aula, por todo apoio, incentivo nos momentos difíceis, pelos incontáveis momentos bons que vivemos juntos, e por terem sido uma família para mim durante todo esse longo trajeto.

A minha amiga leidiane Silva, pelo apoio incondicional e por toda ajuda, compreensão, companheirismo durante o período de desenvolvimento do presente trabalho.

A minha amiga Haruko Sugawara e ao seu namorado Eduardo pela ajuda no momento mais difícil que passei.

Aos meus amigos Ozano e família, Lázaro e família e Ozéias e família.

E a todos os amigos de futebol em Santo Antônio do Tauá.

E por fim mas não menos importantes a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Meus sinceros agradecimentos a todos

RESUMO

Dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos (ex.: implantes ortopédicos, bloco de motor, miniaturas); peças de extrema responsabilidade como as que se destinam à indústria aeronáutica e aeroespacial (palhetas de turbina, por exemplo). É lógico que toda essa variedade não é obtida com um único processo e sim escolhendo-se dentre os processos disponíveis o que melhor se adapta às exigências do cliente e produz o lote encomendado com o mínimo custo dentro do prazo estipulado. 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 combina 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, com propriedades mecânicas próximas daquelas de um produto forjado. Atualmente, componentes de ligas de alumínio, cobre, magnésio, ferro fundido, aços inoxidáveis e de superligas à base de níquel são facilmente fabricados por tal processo. O objetivo do presente trabalho foi analisar a influência dos parâmetros operacionais como pressão e tempo de prensagem na macro e microestrutura de solidificação da liga Alumínio-Cobre-Magnésio, analisar o limite de resistência à tração e dureza através do processo *Squeeze Casting*, fazer uma análise da fratura após o ensaio mecânico de tração. Utilizou-se neste trabalho 3 composições para a mesma liga: Al-6%Cu-1%Mg; Al-6%Cu-2%Mg e Al-6%Cu-3%Mg , pressão constante de 100 MPa e tempo de 30s. Os resultados obtidos mostraram que os parâmetros utilizados exercem forte influência na macro e microestrutura, dureza e resistência mecânica O estudo das propriedades da liga Al-Cu-Mg mostram-se satisfatórios, pois através do processo de *Squeeze Casting* houve uma melhora significativa em todas as propriedades analisadas.

Palavras-chave: *Fundição, Squeeze casting, Resistência a tração.*

ABSTRACT

Among the manufacturing processes, the foundry is notable for allowing the production of parts with a wide variety of shapes and sizes (eg orthopedic implants, motor blocks, miniatures); Such as those destined for the aeronautics and aerospace industry (turbine vanes, for example). It is logical that all this variety is not obtained with a single process but choosing among the processes available which best fits the requirements of the customer and produces the batch ordered with minimal cost within the stipulated time. Among all the casting methods known as squeeze casting stands out among the innovators. The squeeze casting process basically consists of the solidification of the metal in a metal mold under the application of high pressures, combining quality, economy and simplicity. The process combines the advantages of casting and forging technologies. The applied pressure and instantaneous contact of the liquid metal with the mold surface generates a condition of rapid heat transfer and produces a pore-free and fine-grained part with mechanical properties close to those of a forged product. Currently, alloy components of aluminum, copper, magnesium, cast iron, stainless steels and nickel-based superalloys are easily manufactured by such process. The objective of the present work was to analyze the influence of the operational parameters such as pressure and pressing time in the macro and microstructure of solidification of the Aluminum-Copper-Magnesium alloy, to analyze the limit of tensile strength and hardness through the Squeeze Casting process, to make an analysis Of the fracture after the mechanical tensile test. 3 compositions for the same alloy were used: Al-6% Cu-1% Mg; Al-6% Cu-2% Mg and Al-6% Cu-3% Mg, constant pressure of 100 MPa and time of 30s. The results obtained showed that the parameters used exert a strong influence on the macro and microstructure, hardness and mechanical strength. The study of Al-Cu-Mg alloy properties are satisfactory, since through the Squeeze Casting process there was a significant improvement in all the Analyzed.

Key words: Casting, Squeeze casting, Tensile strength.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Desenho esquemático ilustrando as operações do processo <i>squeeze casting</i> . (a) Fusão do Metal e pré-aquecimento do molde. (b) Vazamento do metal líquido. (c) Fechamento do molde e aplicação de pressão. (d).....	15
Figura 2- Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta.	15
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.	16
Figura 4 – Macroestrutura de solidificação.....	21
Figura 5 - Em (a) microestrutura celular e em (b) microestrutura dendrítica.	22
Figura6 – Representação esquemática do crescimento dendrítico apontando direções de movimentação de soluto.....	23
Figura 7 – Representação esquemática da atuação de fatores de influência na formação de estruturas de solidificação: SRC - grau de super-resfriamento; GL – gradiente térmico à frente da interface; VL- velocidade da interface; e CO- concentração de soluto.	24
Figura 8 - Esquema ilustrativo do perfil de concentração à frente da interface sólido/líquido (A), perfil de temperaturas liquidus à frente da interface sólido/líquido (B) e região super-resfriada constitucionalmente à frente da interface sólido/líquido (C).	24
Figura 9 – Direções de crescimento esquemáticas: morfologia celular (A) , morfologia de transição celular a dendrítica (B) e morfologia dendrítica (C), onde a direção de crescimento é definida por fatores cristalográficos.	26
Figura 10 – Representação dos espaçamentos dendríticos primários (λ_1), secundários (λ_2) e terciários (λ_3)	27
Figura 11 – Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais.....	28
Figura 12 – Diagrama de fase Al-Cu	30
Figura 13 - Arvore das ligas de cobre	32
Figura 14 – Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional).....	35
Figura 15 – Corpos-de-prova	36
Figura 16 - Escalas comparativas dos valores para os vários métodos de durezas e aplicações recomendáveis para diversos materiais (Adaptado de Jástrzebski, 1987).....	37
Figura 17 – Ilustração d método de dureza Brinell (HB).....	38
Figura 18 – Ilustração de um ensaio de dureza Rockwell (HR).....	39
Figura 19 – Esquema para realização do Ensaio de Microdureza.....	40
Figura 20 – Tabela com valores experimentais de A para alguns materiais	41
Figura 21 – Fluxograma do Procedimento Experimental	42
Figura 22 - (a) Cadinho de carbetto de silício, (b) Forno elétrico utilizado na fusão das ligas e (c) Balança digital utilizada para pesagem dos materiais para obtenção das ligas.....	43
Figura 23 – Sistema de aquisição de dados, plug-conector e haste de Aço ASTM 1045, utilizados no registro das temperaturas envolvidas nos experimentos (d).	44
Figura 24 - Perfil da Lingoteira de aço 1045 e Prensa hidráulica semi-automática utilizada	45
Figura 25 - Microscópio óptico com interface digital (e); Microduromêtro (f), Máquina de Ensaio mecânicos e (g) EDS (h).....	46
Figura 26 – Entrada do cadinho no forno aquecido e aferimento da temperatura da liga.....	47
Figura 27 - Manutenção da temperatura (a), Vazamento (b) e Lingote pronto (c)	47
Figura 28 – Máquina Politriz	48

Figura 29 – Esquema para produção dos corpos de prova a partir da usinagem em torno mecânico	50
Figura 30 – Lingotes inteiros e visão do corte feito longitudinalmente para usinagem dos corpos de prova.	50
Figura 31 – Corte feito no lingote para confecção dos corpos de prova	51
Figura 32 – Dimensões proporcionais recomendadas. Em destaque, no quadrado, o utilizado no procedimento deste trabalho.....	51
Figura 33 – Corpos-de-prova para o ensaio de tração.....	52
Figura 34 - Visão aproximada da garra que acopla o corpo de prova (a) e corpo de prova posicionado na máquina de ensaios (b).....	52
Figura 35 - Macrografia para liga 1% Mg em (a), 2% Mg em (b) e 3% Mg em (c).....	53
Figura 36 – Secção ampliada da macroestrutura do lingote cortado.....	54
Figura 37 – Micrografia da liga com 1% de Mg com aumento de 50X.....	55
Figura 38 – Micrografia da liga com 2% e 3% de Mg com aumento de 50X.....	56
Figura 39 – Imagem da fratura após ensaio de tração, liga com 1% Mg, aumento 1000 X.....	58
Figura 40 - Imagem da fratura após ensaio de tração, liga com 2% Mg, aumento 1000 X.	58
Figura 41 – Imagem da fratura após ensaio de tração, liga com 3% Mg, aumento 1000 X.....	58
Figura 42 – Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-1%Mg.	59
Figura 43 – Espectrômetro da Liga Al-6%Cu-1%Mg	59
Figura 44 – Análise Química da liga Al-6%Cu-1%Mg	60
Figura 45 – Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-2%Mg	60
Figura 46 – Espectrômetro da Liga Al-6%Cu-2%Mg	61
Figura 47 – Análise Química da liga Al-6%Cu-2%Mg	61
Figura 48 – Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-3%Mg.	62
Figura 49 – Espectrômetro da Liga Al-6%Cu-3%Mg	62
Figura 50 - Análise Química da liga Al-6%Cu-3%Mg.....	63
Figura 51 – Valores de dureza, média e desvio padrão médio para o lingote 3% Mg.	65
Figura 52 - Comparação entre as Durezas	65
Figura 53 – Corpo de prova ensaiado	67
Figura 54 – Gráfico da tensão versus deformação para cada corpo de prova ensaiado da liga Al-6%Cu-1%Mg.....	68
Figura 55 – Gráfico da curva característica, das médias dos corpos de prova para liga com 1% de Mg	68
Figura 56 – Gráfico da tensão versus deformação para cada corpo de prova ensaiado da liga Al-6%Cu-2%Mg.....	69
Figura 57 – Gráfico da curva característica, das médias dos corpos de prova para liga com 2% de Mg	69
Figura 58 – Gráfico da tensão versus deformação para cada corpo de prova ensaiado da liga Al-6%Cu-3%Mg.....	70
Figura 59 – Gráfico da curva característica, das médias dos corpos de prova para liga com 3% de Mg	70
Figura 60 – Gráfico das curvas características, representando a resistência a tração média para todas as composições.	71
Figura 61 - Gráfico comparativo do LRT experimental e LRT da dureza Brinell.....	73

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Representação dos Percentuais dos elementos de liga Al-6%Cu-2%Mg.....	61
Tabela 2 - Representação dos Percentuais dos elementos de liga Al-6%Cu-3%Mg.....	63
Tabela 3 – Valores de dureza, média e desvio padrão médio para o lingote 1% Mg....	64
Tabela 4 – Valores de dureza, média e desvio padrão médio para o lingote 2% Mg....	64
Tabela 5 – Valores do ensaio de tração para a liga com Al-6%Cu-1%Mg	66
Tabela 6 – Valores do ensaio de tração para a liga com Al-6%Cu-2%Mg	66
Tabela 7 – Valores do ensaio de tração para a liga com Al-6%Cu-3%Mg	67
Tabela 8 – Composições de liga e valor médio de dureza Brinell.....	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. OBJETIVOS GERAIS	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1. O PROCESSO SQUEEZE CASTING.....	14
3.1.1. Parâmetros do processo	17
3.1.2. Capacidade de produção.....	18
3.1.3. Defeitos e métodos de prevenção.	19
3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO.....	21
3.2.1. A Instabilidade da Interface Sólido/Líquido	23
3.2.2. Estrutura Celular.....	25
3.2.3. Estrutura Dendrítica.....	26
3.2.4. Macroestrutura.....	27
3.2.5. Microestrutura	28
3.3. ALUMÍNIO E SUAS APLICAÇÕES.....	29
3.4. O COBRE.....	30
3.5. AS LIGAS Al/Cu	31
3.6. ANÁLISE METALOGRAFICA.....	33
3.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS	33
3.8. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	34
3.8.1. Corpos-de-prova	35
3.8.2. Equipamento.....	36
3.9. ENSAIO DE DUREZA	37
3.10. CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRACÃO CONVENCIONAL	40
4. METODOLOGIA.....	42
4.1. ANALISE EXPERIMENTAL	42
4.2. MATERIAIS	43
4.2.1. Acessórios e equipamentos para obtenção da Liga e lingotes.....	43

4.2.2. Acessórios e Equipamentos Para Controle das Temperaturas.....	44
4.2.3. Utensílios Operacionais.....	44
4.2.4. Equipamentos para as análises experimentais.....	45
4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	46
4.4. ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA	48
4.5. EDS49	
4.6. DUREZA.....	49
4.7. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	49
5. RESULTADOS E DISCUSÕES	53
5.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL	53
5.1.1. Análise da liga Al-Cu-Mg	53
5.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	54
5.3. ANALISE DA FRATURA.....	57
5.4. ANÁLISE QUÍMICA.....	59
5.5. ANÁLISE DE DUREZA.....	63
5.6. LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (LRT)	66
5.7. RESULTADO DA CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO CONVENCIONAL	72
6. CONCLUSÕES	74
6.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL	74
6.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	74
6.3. ANÁLISE DO LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E DUREZA.....	74
6.4. CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRACÃO	75
REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

A fundição é um dos mais antigos e o mais versátil processo de fabricação de componentes metálicos. Os diversos processos de fundição permitem produzir desde milhões de peças de pequeno tamanho até poucas peças pesando várias toneladas. Os metais têm tido um importante papel no desenvolvimento da civilização humana. Nesse desenvolvimento não houve um metal, além do aço, tão versátil quanto o alumínio, por conta de suas únicas e intrínsecas características [1].

Em 1981 a *American Foundrymen's Society* listou 38 diferentes métodos de fundição [2], os quais se agrupam em cinco categorias principais; uma dessas categorias sendo a dos processos inovadores de moldagem e fundição. Dentre estes processos inovadores destaca-se o processo *squeeze casting*; literalmente fundição por aperto (compressão), também conhecido como forjamento do metal líquido, fundição por extrusão ou cristalização sob pressão [3].

Basicamente, tal processo consiste na solidificação do metal em um molde metálico sob a aplicação de altas pressões. Esta técnica é relativamente simples e econômica, e possui um grande potencial para automatização e altas taxas de produção. O produto geralmente tem a forma final, pois o processo permite fundir peças finas de geometrias complexas e de alta qualidade. O primeiro experimento sobre o assunto foi realizado na Alemanha por V. G Welter com uma liga de Al-Si. Posteriormente este processo foi difundido pelos EUA, Japão e Europa. Embora seja um conceito antigo, o processo *squeeze casting* passou a ter maior significado industrial e científico a partir dos anos de 1930, inclusive na Alemanha que estudou a aplicação do processo em ligas ferrosas e não ferrosas a base de cobre [3]. Em 1950 foi realizado um estudo para considerar o efeito da aplicação de pressão na solidificação dos metais para diminuir os defeitos de fundição, entretanto, o experimento não obteve êxito devido às baixas pressões empregadas. Este fato levou dois cientistas americanos, Resis e Kron a realizar o primeiro *Squeeze Casting* em solo Americano [4].

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* [3]. As aplicações incluem componentes automotivos como pistões, discos de freio, rodas e cubos, componentes de mísseis e engrenagens [4]. 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 [5].

No presente trabalho, foi avaliado o limite de resistência à tração, Metalografia, e dureza da liga Alumínio/Cobre com adições de Magnésio obtida a partir da fundição do alumínio, cobre e magnésio (materiais puros),solidificados pelo processo *squeeze casting*.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da pressão, bem como os teores dos elementos da liga Al-Cu-Mg, no comportamento dendrítico da mesma, sua dureza, fazendo uma correlação com a microestrutura e realizar um ensaio mecânico de tração para analisar as propriedades da liga em estudo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a macro e microestrutura dos lingotes;
- Confeccionar os corpos de prova para o ensaio de tração
- Analisar quimicamente a liga, a fim de atestar sua conformidade.
- Analisar a microestrutura de tal liga e correlacionar os resultados com as propriedades mecânicas – limite de resistência à tração e dureza.
- Comparar os resultados de resistência à tração da liga analisada com outras ligas Al-Cu-Mg e estimar o limite e resistência à tração a partir dos seus resultados de dureza Brinell.
- Analisar as fraturas dos corpos de prova.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. O PROCESSO SQUEEZE CASTING

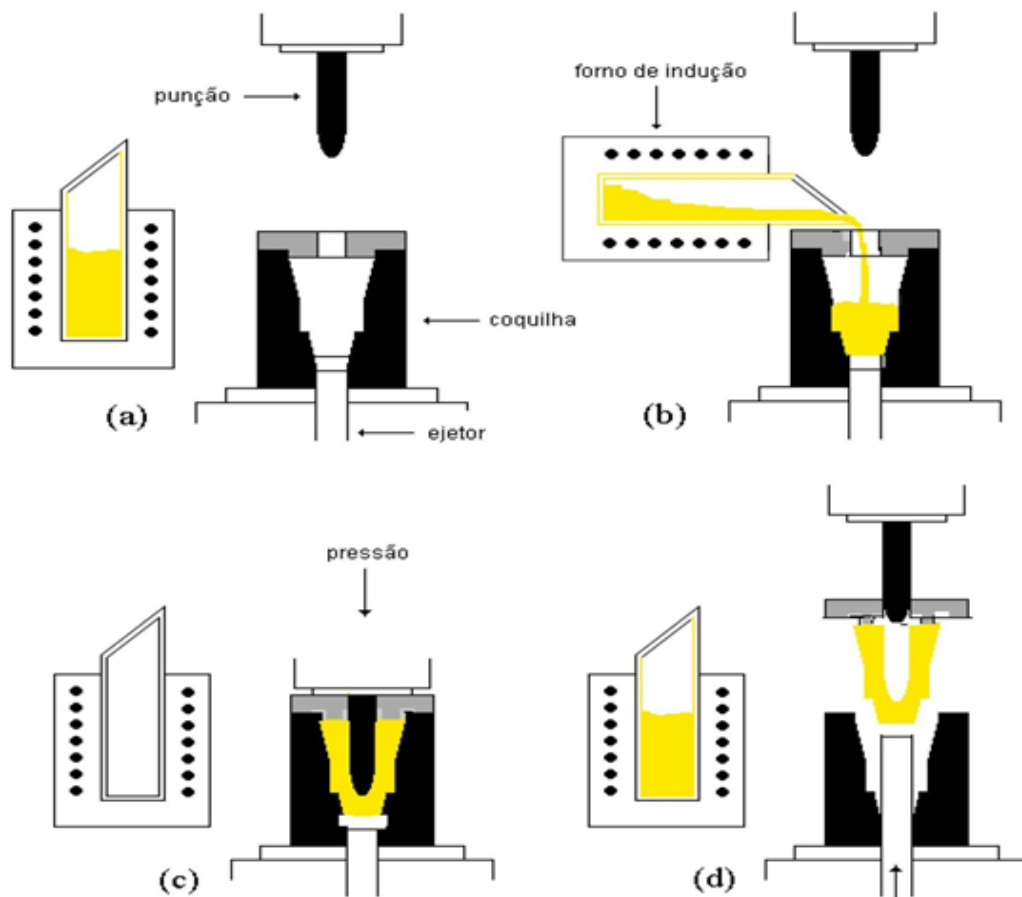
O conceito de ‘*squeeze casting*’, foi originalmente introduzido em uma patente britânica de 1819 e “imaginado” pelo russo D. K. Chernov que o citou em um relatório de 1878. Detalhadas investigações foram efetuadas na Rússia para ligas de cobre e ferro relacionando-se as variáveis do processo até que, nos anos 60, os russos já possuíam 150 instalações industriais produzindo 200 diferentes componentes metálicos através de *squeeze casting* [7].

Também conhecido como fundição de aperto ou forjamento de metal líquido, é um processo através do qual o metal fundido se solidifica sob pressão no interior fechado e morre posicionado entre os pratos de uma prensa hidráulica. A pressão aplicada e o contato imediato do metal fundido com a superfície do molde produzem uma condição de transferência de calor rápida, que produz uma fundição de grãos finos livres de poros e com ótimas propriedades mecânicas. Foi introduzido nos Estados Unidos em 1960 e, desde então, ganhou ampla aceitação na indústria de fundição de metais não ferrosos. Alumínio, magnésio, e ligas de cobre são componentes facilmente fabricados utilizando esse processo.

O processo é mostrado esquematicamente na Figura 1 e pode ser dividido em quatro etapas:

- 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 sob o metal fundido e é mantida até que todo o metal esteja solidificado;
- O punção retorna para sua posição original e a peça fundida é ejetada.

Figura 1- Desenho esquemático ilustrando as operações do processo *squeeze casting*. (a) Fusão do Metal e pré-aquecimento do molde. (b) Vazamento do metal líquido. (c) Fechamento do molde e aplicação de pressão. (d)



Fonte: [6]

Em geral, existem dois tipos de ‘squeeze casting’: por prensagem direta e indireta (Figura 2) [3].

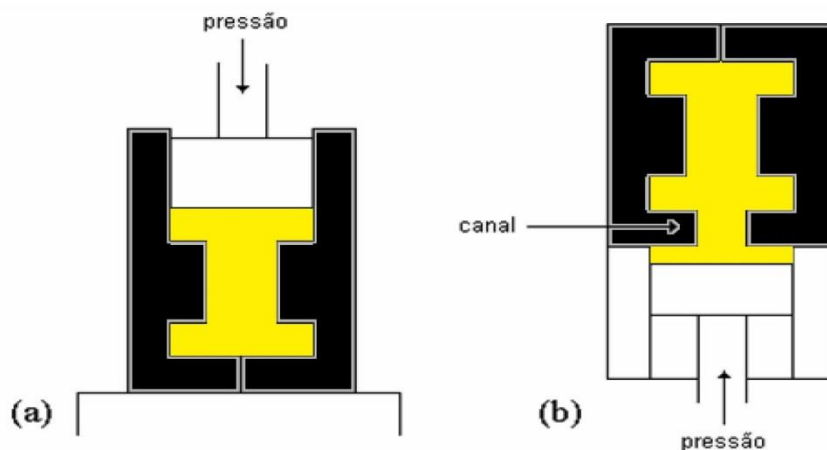
A técnica de prensagem direta é caracterizada pela imposição da pressão diretamente sobre a superfície total da peça, proporcionando máxima densidade e uma transferência de calor extremamente rápida resultando em um material de granulação fina e com excelentes propriedades mecânicas [4]

A técnica de pressão indireta é mostrada na Figura 1. Neste caso o metal líquido é vazado em um recipiente ligado à coquilha por um canal; o metal é então 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 [4].

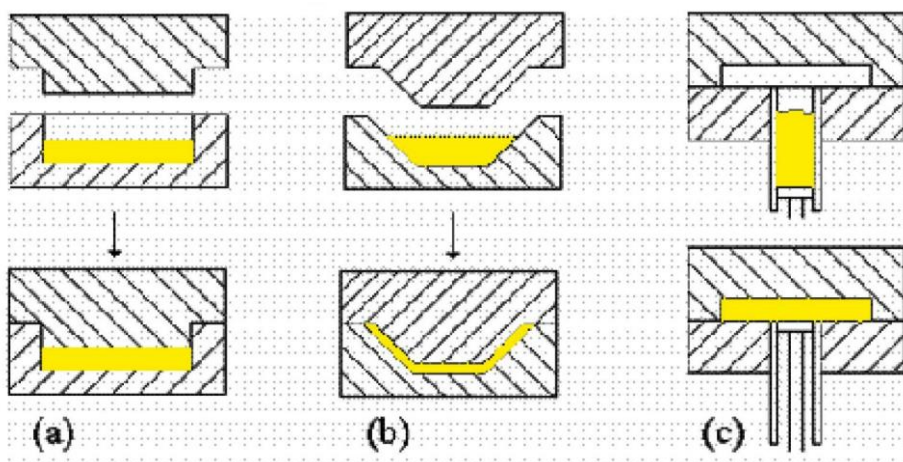
Figura 2 - Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta.



Fonte: [6]

Alternativamente, levando-se em consideração a forma da peça, a prensagem também pode ser classificada como direta, com extrusão e indireta conforme a figura abaixo [4]

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: [6]

3.1.1. 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, como tipo de liga utilizada e com a geometria da peça e são os seguintes:

- ***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 [3].

- ***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 [11]. 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 10 kg, o tempo de aplicação da pressão pode variar entre 30 e 120s [4]
- **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 [11].
- **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 ótima a partir da 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.

3.1.2. Capacidade de produção

Nos dias atuais há uma necessidade de reduzir o consumo de material e com isso uma grande demanda de peças com alta relação resistência/peso. Neste contexto o processo *squeeze casting* se apresenta como uma alternativa aos processos tradicionais de fundição e forjamento [27]. Ele se destaca por:

- **Produtividade:** é um processo simples e econômico, utiliza de forma racional a matéria-prima e, devido ao potencial para automatização, tem alta produtividade. Entretanto,

um grande volume de produção é necessário para justificar os custos de instalação e ferramentas. A taxa de produção se situa entre 15 e 60 peças/hora/máquina. O processo possibilita a obtenção de peças com excelentes propriedades mecânicas e uma microestrutura refinada livre de poros o que o torna indicado para a fabricação de peças com elevado grau de confiança em seu desempenho;

- **Dimensões e peso das peças fundidas:** os fatores limitantes estão relacionados com as capacidades de pressão e o tamanho das prensas;
- **Seções finas:** já foram produzidas peças com seções de 0,3mm de espessura, embora seja normal a obtenção de seções em torno de 6 mm;
- **Peças vazadas:** podem-se obter furos com a colocação de machos nos moldes;
- **Reprodução de detalhes:** a aplicação da pressão durante a solidificação assegura um elevado grau de reprodução de detalhes do molde para a peça;
- **Precisão dimensional:** a possibilidade da produção sem acabamento posterior é a grande vantagem do processo squeeze casting. Para uma tolerância de $\pm 0,05$ mm a porcentagem de aceitação das peças é cerca de 99,9%.

3.1.3. 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 [4]:

- **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 [12] 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.

- **Segregação por extrusão** – a micro segregação que ocorre em *squeeze casting* é muito inferior aos valores obtidos por outros processos. Entretanto, as zonas preenchidas por extrusão inversa são ricas em soluto e as últimas a se solidificar. Isto pode levar a variações locais nas propriedades mecânicas e de corrosão. A solução é melhorar o sistema de alimentação, aumentar a temperatura das ferramentas e diminuir o tempo de espera para aplicação da pressão.
- **Segregação pela linha central** – defeito habitualmente encontrado em ligas forjadas de alumínio com soluto de baixo ponto de fusão. O soluto fica em geral retido no centro das partes mais maciças da peça, que é a última a se solidificar. O defeito é evitado tomando-se as mesmas medidas sugeridas para o caso acima. Às vezes é necessária a escolha de uma liga alternativa.
- **Trincas a frio** – são causadas quando o metal líquido recobre camadas já solidificadas. Para evitar este problema deve-se aumentar a temperatura de vazamento e/ou a temperatura da coquilha.
- **Trincas a quente** – ocorrem em ligas com grande intervalo de solidificação. A contração da fase sólida em torno da superfície do molde pode iniciar rupturas em zonas já parcialmente solidificadas. Neste caso deve-se reduzir a temperatura de vazamento e da coquilha, aumentar o tempo de pressurização e aumentar os ângulos de extração da peça. Aderência – se o ciclo de produção for muito rápido as ferramentas não tem tempo para resfriar e, assim, uma camada fina adere à superfície do molde em alguns pontos devido à micro soldagem. Diminuir a temperatura de vazamento minimiza o problema embora a redução da temperatura da coquilha seja mais recomendável [13].

3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO.

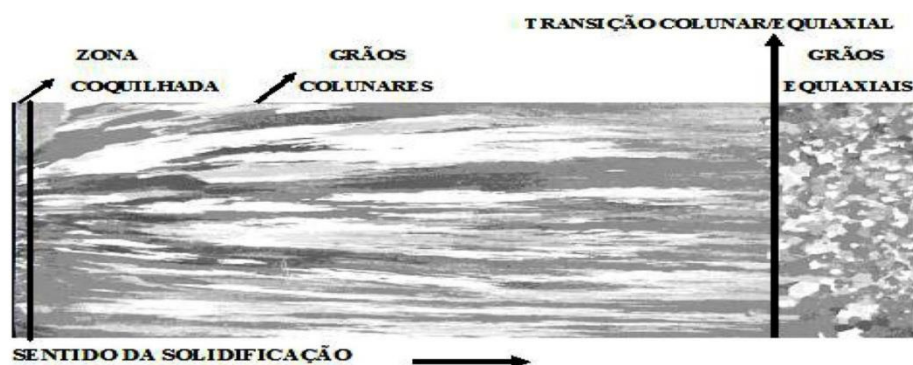
A solidificação é um fenômeno de transformação de fases com mudança de estado muito comum no nosso dia a dia, desde a corriqueira produção de gelo e do congelamento de alimentos líquidos, passando pelos processos de fundição estática e contínua e soldagem na indústria metal-mecânica e até a produção de cristais de alta perfeição aplicados em componentes eletrônicos e células solares. A produção de peças e componentes metálicos, com exceção daqueles produzidos pelo processo de metalurgia do pó, passa pelo processo de solidificação, que é analisado como um processo de transferência de calor e massa.

A estrutura resultante da solidificação, que pode ser caracterizada tanto de forma macro como microestrutural, determina as propriedades dos produtos finais que podem ser utilizados no estado bruto de solidificação ou trabalhados até a forma de barras, chapas, fios, monocristais de alta precisão para a fabricação de computadores, calculadoras, entre outros.

A estrutura bruta de solidificação, de um modo geral, pode ser discutida a partir das macroestruturas observadas em peças ou lingotes e é caracterizada pelos seus grãos cristalinos.

Na solidificação de lingotes, dependendo das condições impostas à solidificação, podem ocorrer três regiões macroestruturais distintas que são: zona coquilhada onde os grãos cristalinos têm orientação aleatória, sendo normalmente de pequenas dimensões e localizados junto às paredes do molde; zona colunar que é constituída por grãos cristalinos alongados e alinhados paralelamente à direção do fluxo de calor e, zona equiaxial central que ocorre na região central do lingote e é caracterizada por grãos cristalinos de orientação aleatória de dimensões relativamente grandes [14]

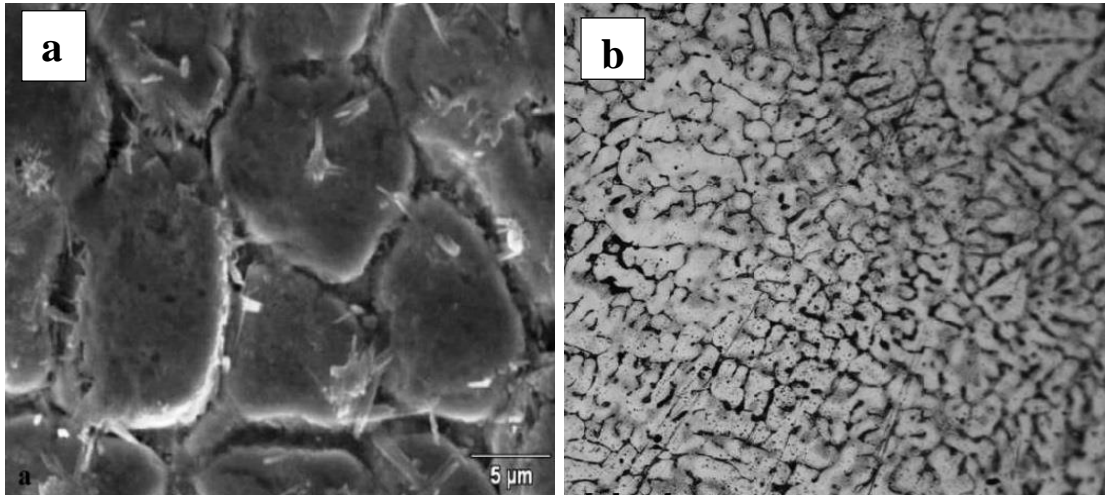
Figura 4 – Macroestrutura de solidificação.



Fonte: [9]

A microestrutura é analisada no interior dos grãos cristalinos, com o auxílio de microscópios. Os grãos, interiormente, podem ter estrutura celular ou dendrítica, conforme se pode observar nas Figuras abaixo.

Figura 5 - Em (a) microestrutura celular e em (b) microestrutura dendrítica.



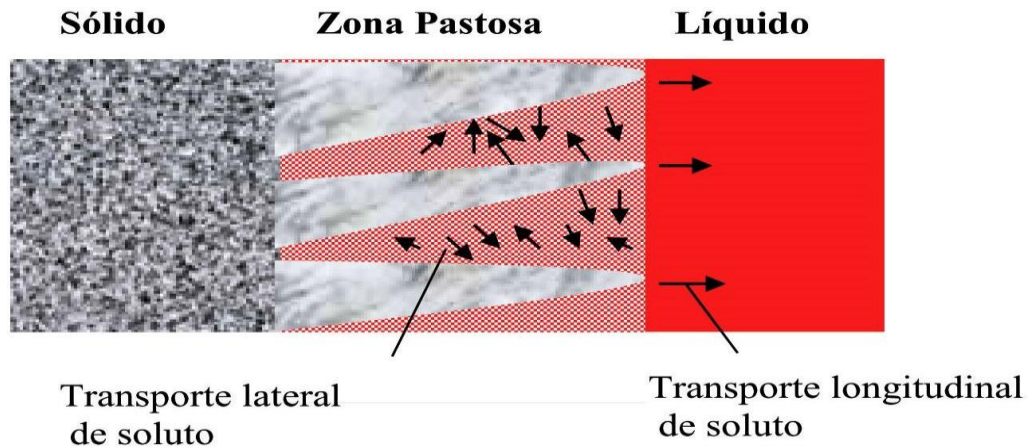
Fonte: a [16]; b [17]

Ainda no processo de solidificação pode ocorrer o fenômeno da segregação que é qualquer diferença de concentração produzida em relação à concentração original de elementos químicos. Ela manifesta-se em uma liga ou em componente impuro como resultado da rejeição de soluto na fronteira sólido/líquido, seguida por uma redistribuição desse durante a evolução do processo de solidificação por meio de mecanismos de transporte de massa. Esse fenômeno é normalmente analisado em dois aspectos: a microsegregação e a macrosegregação.

A microsegregação refere-se à diferenças de concentração de curto alcance, como aquelas existentes entre células e ramificações dendríticas, enquanto a macrosegregação envolve diferenças de composição de longo alcance como as verificadas entre a superfície e o centro de peças fundidas ou lingotes.

A Figura 6 ilustra que a estrutura dendrítica provoca tanto rejeição de soluto lateral quanto longitudinal a partir do sólido formado. O transporte de soluto longitudinal que ocorre de forma paralela às ramificações ou eixos dendríticos primários provoca a macrosegregação, enquanto a rejeição lateral de soluto em direção perpendicular a esses eixos é responsável pela microsegregação.

Figura6 – Representação esquemática do crescimento dendrítico apontando direções de movimentação de soluto



Fonte: [18]

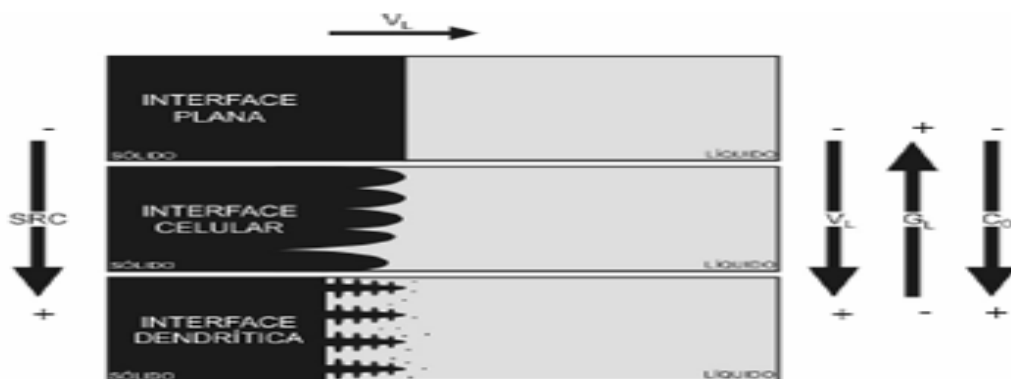
3.2.1. A Instabilidade da Interface Sólido/Líquido

Modificações que ocorrem na interface entre o sólido e o líquido durante a solidificação são responsáveis pelas microestruturas presentes na liga, que podem passar da forma plana típica nos metais puros para estruturas celulares e dendríticas.

A instabilidade da interface plana é ocasionada pela segregação de soluto que provoca um aumento dos seus teores frente à interface de solidificação que pode implicar em uma distribuição não uniforme dos mesmos no líquido. O acúmulo de teor de soluto à frente desta interface, juntamente com condições térmicas favoráveis produz um fenômeno chamado de super-resfriamento constitucional que é responsável pela instabilidade da interface plana.

Dependendo do valor do super-resfriamento constitucional, a instabilidade causada na interface sólido/líquido dá origem a diferentes morfologias: planar, celular e dendrítica, conforme esquema apresentado na Figura 7.

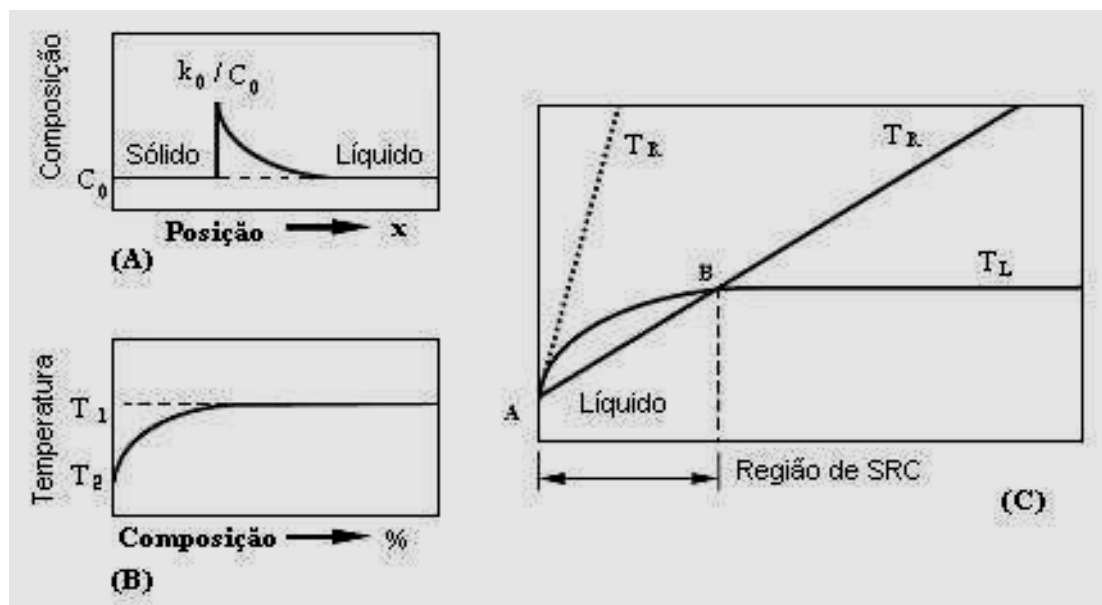
Figura 7 – Representação esquemática da atuação de fatores de influência na formação de estruturas de solidificação: SRC - grau de super-resfriamento; GL – gradiente térmico à frente da interface; VL- velocidade da interface; e CO- concentração de soluto.



Fonte: [19]

A interface será desestabilizada, toda vez que o gradiente térmico no líquido, à frente da interface sólido/líquido, é menor que o gradiente da linha liquidus, em função do acréscimo de soluto à frente da interface sólido/líquido, devido à partição e ao acúmulo de soluto no líquido. Essa situação encontra-se esquematizada na Figura 8.

Figura 8 - Esquema ilustrativo do perfil de concentração à frente da interface sólido/líquido (A), perfil de temperaturas liquidus à frente da interface sólido/líquido (B) e região super-resfriada constitucionalmente à frente da interface sólido/líquido (C).



Fonte: [20]

O super-resfriamento constitucional ocorre na porção de líquido à frente da interface, que apresenta temperatura *liquidus* (TL) acima da temperatura real (TR), segundo o gradiente térmico vigente, isto é, do ponto A até o ponto B.

Quando uma liga binária é solidificada na presença de uma pequena quantidade de super-resfriamento constitucional a interface sólido/líquido desenvolve normalmente uma estrutura celular, o super-resfriamento constitucional acarreta a formação de uma protuberância que se projeta a partir da interface no líquido super-resfriado.

Ao crescer esta protuberância rejeita soluto e a sua concentração lateral é maior do que em qualquer outro ponto do líquido, nestas condições adquire uma forma instável que se estende por toda a interface gerando uma morfologia celular.

O crescimento celular ocorre em velocidades baixas e perpendicularmente à interface sólido/líquido, na direção do fluxo de calor, independente da orientação cristalográfica. Quando ocorre um aumento do super-resfriamento têm-se a formação de instabilidades de maior ordem e a estrutura celular se transforma em estrutura dendrítica.

3.2.2. Estrutura Celular

Quando se tem um aumento do super-resfriamento constitucional ocorre instabilidade na interface sólido/líquido o que ocasiona mudanças morfológicas no material durante o fenômeno de solidificação. Ocorre a formação de protuberâncias que se projetam a partir da interface no líquido super-resfriado até um ponto em que o super-resfriamento seja apenas necessário para manter a força motriz do crescimento. Durante o crescimento dessas protuberâncias ocorre a rejeição de soluto tanto longitudinalmente à frente da interface quanto lateralmente, ocasionando uma concentração maior de soluto nas regiões laterais em comparação com qualquer outro ponto do líquido. A protuberância adquire uma forma estável, pois o líquido que a envolve está em uma condição de super-resfriamento suficiente apenas para manter um regime estacionário de crescimento.

A estrutura celular pode ser caracterizada pelos seguintes aspectos:

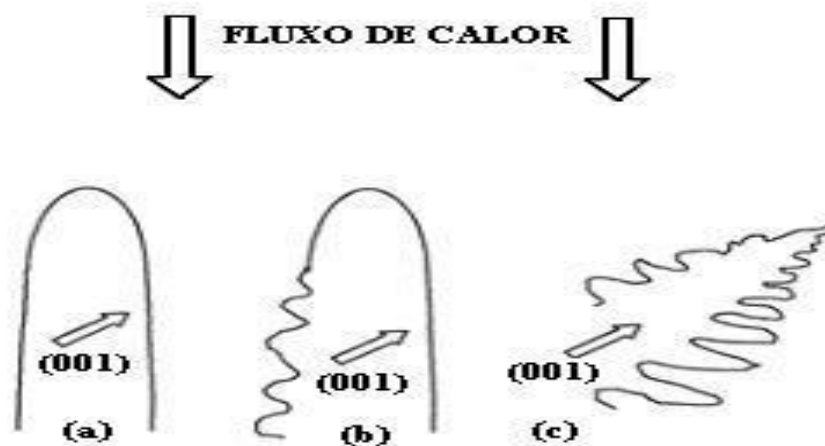
- A superfície da célula é convexa em direção ao líquido;
- Em sistemas com coeficiente de distribuição de soluto < 1 a concentração de soluto é maior nas paredes da célula do que em seu centro;
- Em sistemas com coeficiente de distribuição de soluto > 1 o solvente é que é segregado nos contornos celulares, enquanto a concentração de soluto é maior no centro das células.

A formação da célula pode ser suprimida caso a velocidade de deslocamento da interface seja subitamente diminuída, ou o conteúdo de soluto reduzido ou mesmo pelo aumento do gradiente térmico, conforme preconizado pelo critério de instabilidade da interface sólido/líquido. É importante também observar que como o super-resfriamento constitucional só pode ocorrer a partir da formação de uma camada limite de soluto segregado junto à interface, como decorrência não pode haver a formação de estrutura celular imediatamente após o início da solidificação.

3.2.3. Estrutura Dendrítica

A transição morfológica celular para dendrítica tende a ocorrer, quando as condições de solidificação são tais que a direção cristalográfica passa a exercer maior influência sobre a direção de crescimento, conforme pode ser visto na Figura 9 [23].

Figura 9 – Direções de crescimento esquemáticas: morfologia celular (A), morfologia de transição celular a dendrítica (B) e morfologia dendrítica (C), onde a direção de crescimento é definida por fatores cristalográficos.



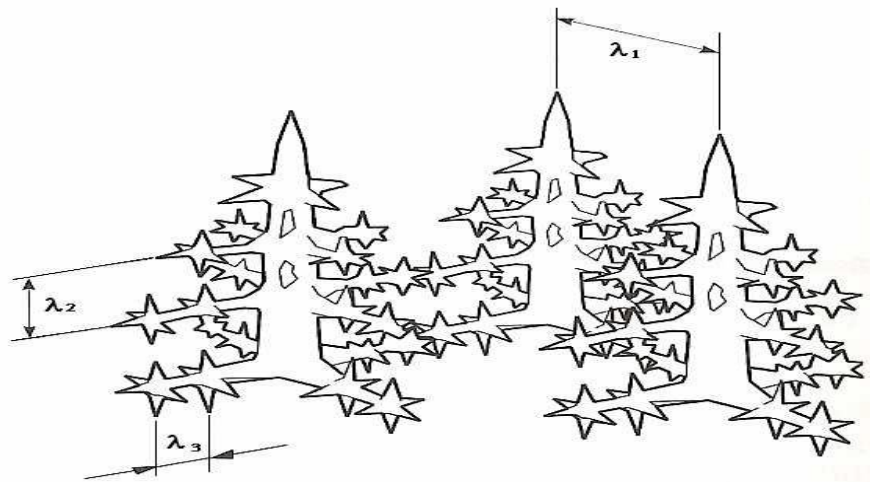
Fonte: [23]

O crescimento ocorre de acordo com a direção cristalográfica preferencial. Simultaneamente a seção transversal da célula, também devido aos efeitos de natureza cristalográfica, começa a se desviar da forma circular original passando a apresentar uma configuração tipo cruz de malta. À medida que a velocidade de crescimento é aumentada ainda mais, começa o surgimento de perturbações laterais que são denominadas de ramificações ou braços secundários e acabam por definir claramente o tipo de estrutura

definida como dendrítica (uma palavra de origem grega que significa árvore). As ramificações primárias crescem na direção dos eixos principais e de acordo com a direção cristalográfica preferencial da estrutura cristalina.

A estrutura dendrítica formada pode caracterizar-se também pelo desenvolvimento de perturbações ao longo de seu eixo principal, denominadas ramificações dendríticas secundárias, provocadas desta vez pela instabilidade da interface entre o eixo principal da dendrita primária e o líquido adjacente. Se a distância entre os eixos principais é significativa, a mesma instabilidade pode ocorrer com os braços secundários ou ramificações secundárias e haver formação de braços ou ramos terciários, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Representação dos espaçamentos dendríticos primários (λ_1), secundários (λ_2) e terciários (λ_3)



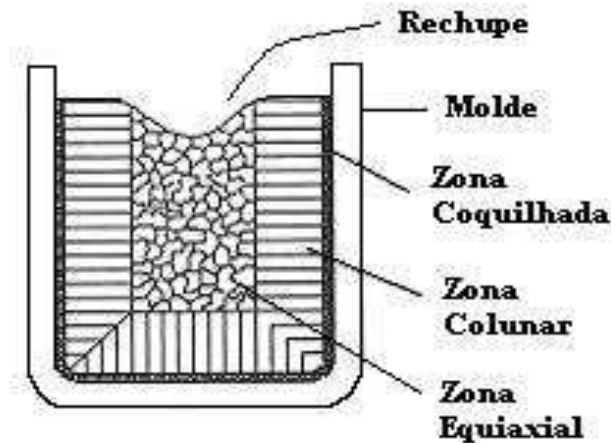
Fonte: [20]

3.2.4. Macroestrutura

Em geral, a macroestrutura de solidificação pode apresentar três zonas distintas, conforme ilustrado na Figura 11.

- Uma zona denominada coquilhada, caracterizada por grãos pequenos produzidos por uma rápida extração de calor junto à interface metal/substrato, predominando a nucleação ao crescimento;
- Uma zona alongada na direção de extração de calor constituída por finos cristais denominados colunares, que se caracteriza por estender-se à frente da zona coquilhada;
- Uma região desordenada de cristais de crescimento aleatório, denominados equiaxiais, no centro do fundido.

Figura 11 – Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais



Fonte: [24]

O calor de transformação liberado remove o superaquecimento do metal líquido inicialmente existente nas proximidades das paredes do molde, e a taxa de resfriamento diminui rapidamente. Como o líquido no centro da lingoteira está a temperaturas acima da temperatura de transformação, não poderá ocorrer a formação de grãos nessa região nestes instantes iniciais e, portanto os únicos grãos que se desenvolverão são aqueles que estão crescendo a partir das paredes do molde e em direção ao líquido. Os grãos que tiverem direções de crescimento mais coincidentes com a direção de extração de calor têm sua seção transversal aumentada à medida que a frente de solidificação vai se afastando do molde. A zona colunar aumenta à medida que maiores temperaturas de vazamento são utilizadas e, como regra geral diminui com o aumento do teor de soluto [25].

3.2.5. Microestrutura

As 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 [7].

Esta taxa de transferência alta de calor resulta em uma estrutura de granulação fina, que também é proveniente do grande número de núcleos (para a solidificação) formados devido à baixa temperatura de vazamento e pressão aplicada [26]. 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, não há necessidade de alta fluidez para o preenchimento do molde.

Nas peças *squeeze casting* existe uma zona particularmente importante, a baixo 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 $\pm 0,75$ mm de maneira que, mesmo após acabamento, ainda permanecerá uma camada super-refinada na superfície de pelo menos 0,5 mm

3.3. ALUMÍNIO E SUAS APLICAÇÕES

O Alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na terra, o mesmo tem se tornado um competidor econômico em aplicação de engenharia, desde o fim do século XIX. A emergência de desenvolvimentos muito importantes como o automobilismo, a aviação e a indústria elétrica, junto com a demanda por um material com as características consistentes com as qualidades únicas do alumínio e suas ligas, beneficiou em muito o crescimento na produção e uso do novo metal [37].

Devido à elevada afinidade para o oxigênio, não é costume encontrá-lo como substância elementar, mas sim, em formas combinadas tais como óxidos ou silicatos [37]. O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. O alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Antes de ser descoberto como metal isolado, o alumínio acompanhou a evolução das civilizações.

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga, formando ligas e a partir dessa combinação ser possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final.

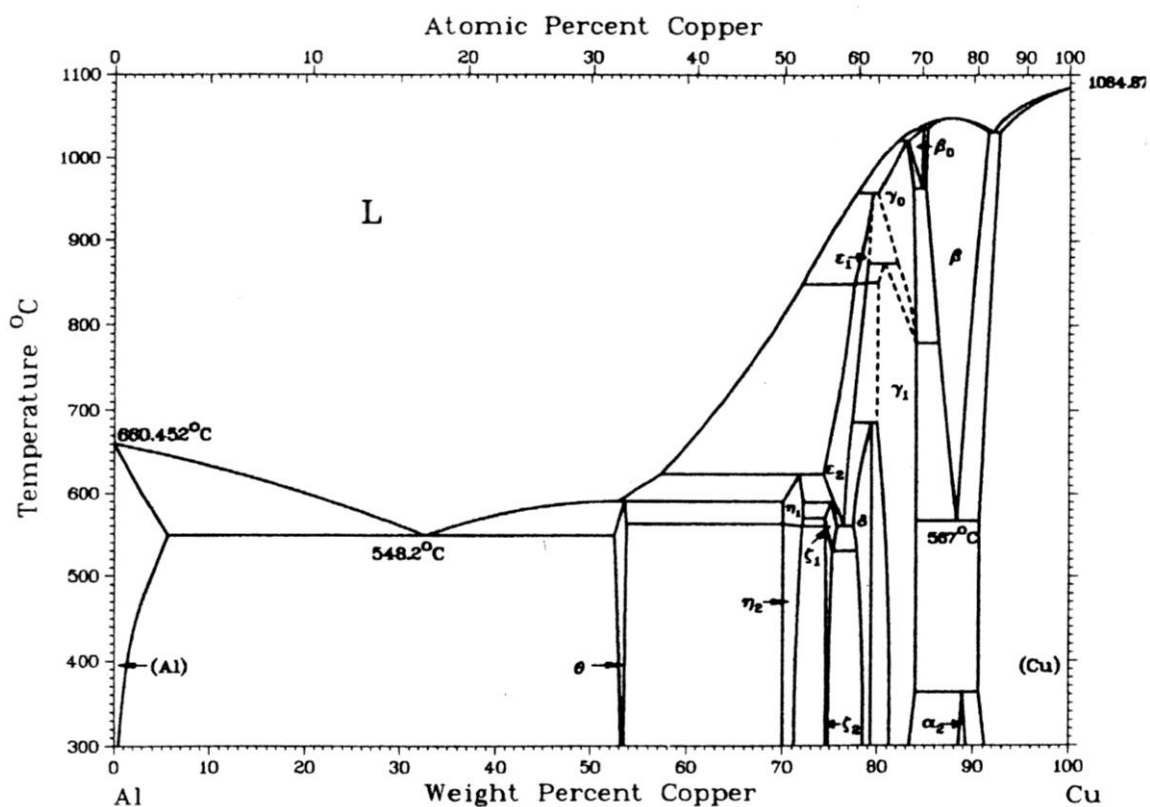
As características do alumínio permitem que ele tenha uma diversa gama de aplicações. Material leve, durável e bonito, o alumínio mostra um excelente desempenho e propriedades superiores na maioria das aplicações. Produtos que utilizam o alumínio ganham também competitividade, em função dos inúmeros atributos que este metal incorpora. O grande alcance das ligas oferece à indústria uma grande variedade de combinações de

resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductilidade, forjabilidade, etc.

3.4. O COBRE

O Cobre é um dos mais importantes elementos de liga do alumínio e produz considerável resistência em solução sólida e com apropriado tratamento térmico pode formar um grande aumento da resistência pela formação de precipitados. A máxima solubilidade do cobre no alumínio ocorre com 5,65% Cu à temperatura eutética de 548°C Figura 12. A solubilidade do cobre no alumínio diminui rapidamente com a diminuição da temperatura de 5,65% Cu para menos de 0,1% Cu à temperatura ambiente.

Figura 12 – Diagrama de fase Al-Cu



Fonte: [28]

3.5. AS LIGAS Al/Cu

As ligas do sistema Al-Cu, conhecidas como ligas da série 2XXX (trabalhadas) e 2XX.X (fundidas) na classificação da Aluminum Association, são as ligas de alumínio de desenvolvimento mais antigo, sendo que o seu surgimento data do início do século XX, quando Alfred Wilm, na Alemanha, descobriu o fenômeno de endurecimento por precipitação [28]. Essas ligas até hoje são conhecidas como duralumínio.

Entre as ligas dessa família a 2017 é a mais antiga e também a mais conhecida. É uma liga que contém 4 % de cobre, 0,5 % de magnésio e 0,7 % de manganês, nas quais a simples introdução desses elementos de liga já eleva a resistência à tração de 89,3 MPa (alumínio comercialmente puro) para 178,5 MPa. O tratamento térmico de envelhecimento (endurecimento por precipitação) por tempo e temperatura controlados ainda permite aumentar ainda mais a resistência à tração, para cerca de 422 Mpa [29].

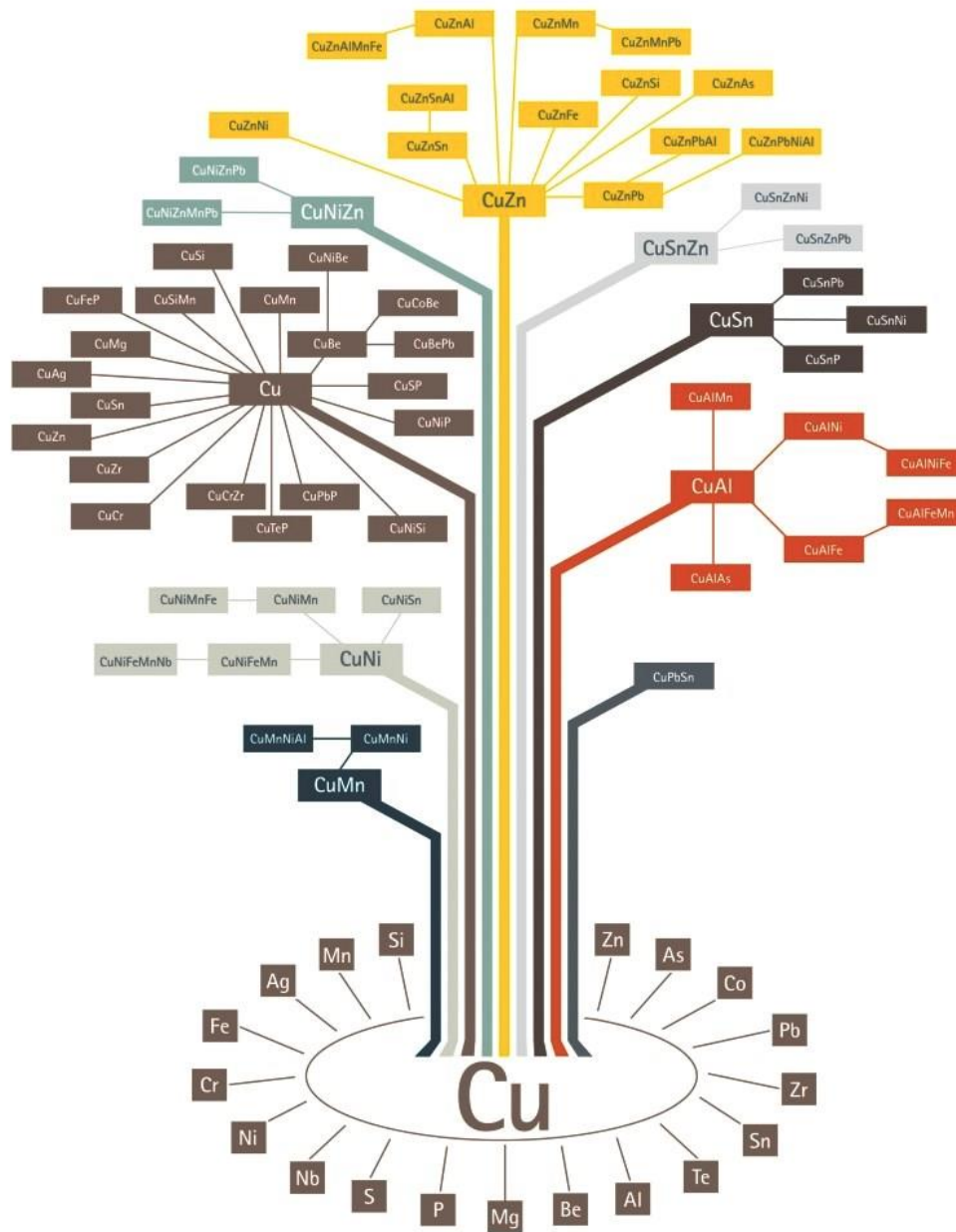
Esse grupo de ligas Al-Cu pode ainda ser subdividido em dois grupos principais: as ligas Al-Cu com teores de magnésio relativamente baixos, como a 2017 mencionada e outras como a 2025 e a 2219, e as ligas Al-Cu com teores de magnésio relativamente altos (também denominadas Al-Cu-Mg), superiores a 1%, como a 2024 (1,5 % de magnésio) e a 2618 (1,6 % de Mg). A principal diferença entre esses dois subgrupos é que nas ligas Al-Cu, mais antigas, só contribuem para o endurecimento por precipitação as fases precursoras da fase θ (CuAl_2): θ'' e θ' , ao passo que nas ligas Al-Cu-Mg é igualmente importante a contribuição da fase S' , precursora da fase S (Al_2CuMg). Se o teor de silício for relativamente alto, também poderá ser encontrada nestas ligas a fase quaternária Q ($\text{Al}_4\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_7$).

As ligas Al-Cu podem apresentar diferentes tipos de elementos de liga, adicionados com diversas finalidades, os quais podem levar à formação de diversas fases diferentes. A liga 2024, por exemplo, possui manganês em teores relativamente altos, que causa a formação da fase $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$, presente também em outras ligas, que sob a forma de partículas dispersóides retardam os processos de recristalização e crescimento de grão. A liga 2011, por exemplo, não apresenta magnésio e manganês em teores elevados, mas sim ferro e silício, havendo a formação da fase Al_7CuFe_2 insolúvel [29].

De um modo geral as ligas Al-Cu apresentam elevada resistência mecânica após tratamento térmico de endurecimento por precipitação, entretanto, apesar dessa vantagem, apresentam algumas desvantagens quando comparadas com outros tipos de ligas de alumínio, que vão desde a resistência à corrosão relativamente baixa e a conformabilidade limitada (são pouco adequadas a processos com elevada deformação, como a extrusão, por exemplo) até a

soldabilidade igualmente restrita (em geral são soldadas somente por processos de resistência elétrica). Os valores mais elevados de dureza são obtidos para teores de cobre da ordem de 4 a 6 %, dependendo da influência de outros elementos de liga presentes.

Figura 13 - Arvore das ligas de cobre



Fonte: [38]

3.6. ANÁLISE METALOGRÁFICA

Existem dois tipos de análise metalográfica, a análise macro e a micrográfica, sendo que a primeira é uma análise feita a olho nu, e a segunda é uma análise com a utilização de um microscópio, neste trabalho foram feitas as duas análises [31].

O ensaio micrográfico, consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (Tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões [32].

Para ambas análises os lingotes foram utilizadas lixas d'água de granulação de 100, 200, 320, 400, 600, 800 e 1200 1500 mesh, polidas em politriz gotejada com Pasta de Diamante para Polimento- 6,5,3 e 1 Microns. A macroestrutura foi revelada com ataque do reagente químico Keller's (15 ml HF; 15 ml HNO₃ ; 45 ml HCl e 25 ml H₂O).

Na análise microestrutural, as amostras foram retiradas de cada lingote polido para então serem levadas 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.

Este também sendo utilizado para medida do tamanho médio de grãos.

Todas as imagens da variação de defeitos e microestruturas modificadas com a variação do soluto de cobre foram coletadas.

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

3.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Fatores que devem ser considerados incluem a natureza da carga aplicada e a duração de sua aplicação, assim como as condições ambientais. A carga pode ser de tração, de compressão ou de cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou variar continuamente. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma

fração de um segundo ou se estender por um período de muitos anos. A temperatura de operação também pode ser um fator importante [33].

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo. Entre as propriedades mecânicas dos materiais existentes, podemos citar: resistência, elasticidade, plasticidade, tenacidade, resiliência, ductilidade, etc. [34, 35].

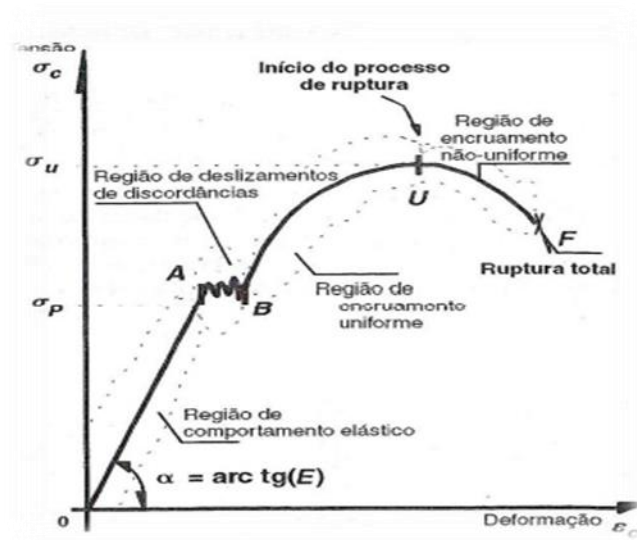
3.8. ENSAIO DE TRAÇÃO

Entre os diversos tipos de ensaio existentes para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais amplamente utilizado é o **ensaio de tração**. Isso se deve ao fato de ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida, além de fornecer informações importantes e primordiais para projeto e fabricação de peças e componentes.

Esse ensaio consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Com isso é possível medir a variação no seu comprimento (L) em função da carga aplicada (P), e após tratamento adequado dos resultados obtém-se um gráfico com uma curva **tensão (σ) versus a deformação (ϵ)** do corpo-de-prova. Trata-se de um ensaio bastante utilizado como teste para o controle das especificações da entrada de matéria-prima e controle de processo. Os resultados obtidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais [21].

Outras características mecânicas principais que o ensaio de tração apresenta incluem o **limite de resistência à tração (σ_u)**, **limite de escoamento (σ_e)**, **módulo de elasticidade (E)**, **módulo de resiliência (U_r)**, **módulo de tenacidade (U_t)**, **coeficiente de encruamento (n)**, **coeficiente de resistência (k)** e parâmetros relativos à **ductilidade do material**, como a **estricção (ϕ)** e o **alongamento (ΔL)** [21]. A Figura 14 apresenta um esboço do gráfico tensão x deformação convencional.

Figura 14 – Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional).



Fonte: [21]

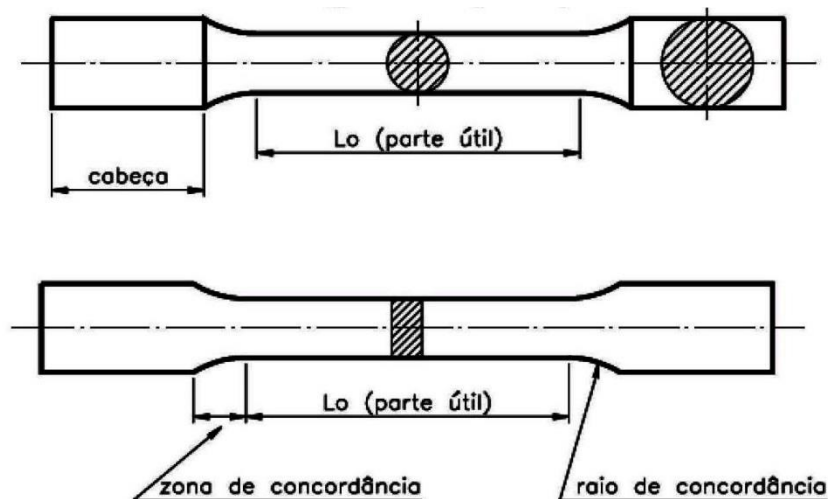
A precisão de um ensaio de tração depende, evidentemente, da precisão dos aparelhos de medida que se dispõe. Com pequenas deformações, pode-se conseguir uma precisão maior na avaliação da tensão ao invés de detectar grandes variações de deformação, causando maior imprecisão da avaliação da tensão. Deve-se centrar bem o corpo-de-prova na máquina para que a carga seja efetivamente aplicada na direção do seu eixo longitudinal [22].

3.8.1. Corpos-de-prova

Os corpos de prova têm 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 [34].

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 seção reduzida do corpo de prova onde acontece a ruptura; esta é a região onde serão feitas as diversas determinações.

Figura 15 – Corpos-de-prova



Fonte: [22]

O resultado de um ensaio de tração deste tipo é registrado em um registrador gráfico ou por um computador, na forma de carga ou força em função do alongamento [27].

3.8.2. Equipamento

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de tração é constituído basicamente de um dispositivo de fixação do corpo de prova acoplado a uma máquina, dotada de sistema eletromecânico ou hidráulico de aplicação de forças crescentes de tração; essa tração é aplicada de maneira contínua até a ruptura do corpo de prova [27].

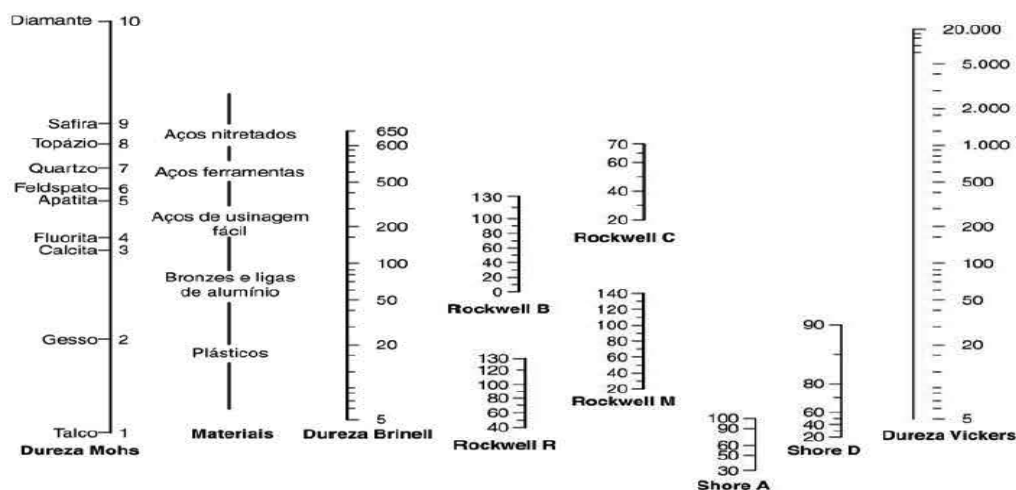
A função básica desta máquina é criar um diagrama de carga versus deslocamento. Uma vez gerado o diagrama, pode-se calcular a tensão de escoamento manualmente com recurso geométrico de lápis e régua, ou via um algoritmo computacional acoplado. Neste caso, são também calculados o módulo de Elasticidade (E), a tensão limite de ruptura e o alongamento total [33].

3.9. ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de **dureza** consiste na aplicação de uma carga na superfície do material empregando um penetrador padronizado, produzindo uma marca superficial ou impressão. A medida da dureza do material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio realizado. Desenvolvido inicialmente para os materiais metálicos, hoje encontra vasta aplicação também para materiais poliméricos, cerâmicos, semicondutores e filmes finos.

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 [21].

Figura 16 - Escalas comparativas dos valores para os vários métodos de durezas e aplicações recomendáveis para diversos materiais (Adaptado de Jástrzebski, 1987).



Fonte: [21]

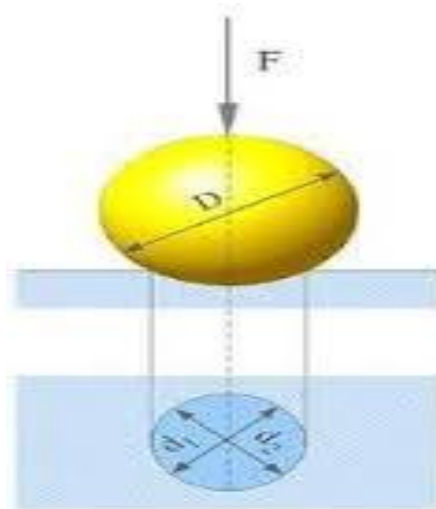
A dureza é uma medida da resistência de um material à deformação plástica local (por exemplo, um pequeno endentamento ou um risco). Os primeiros testes de dureza eram baseados em minerais naturais com uma escala construída somente com base na capacidade de um material riscar um outro que é mais macio [27]. 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 trabalha a frio, endurecimento por precipitação ou tratamento térmico [30].

Ao longo dos anos foram desenvolvidas Técnicas de Dureza Quantitativas nas quais um pequeno indentador é forçado para dentro da superfície de um material a ser testado, sob controladas condições de carga e de taxa de aplicação. É medida a profundidade ou o tamanho da resultante indentação que por sua vez é relacionada ao número de dureza; quanto mais macio o material, tanto maior e mais profunda a indentação e tanto menor o número índice de dureza [27].

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) (figura 10). 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 [29, 30].

Figura 17 – Ilustração d método de dureza Brinell (HB)



Fonte: [42]

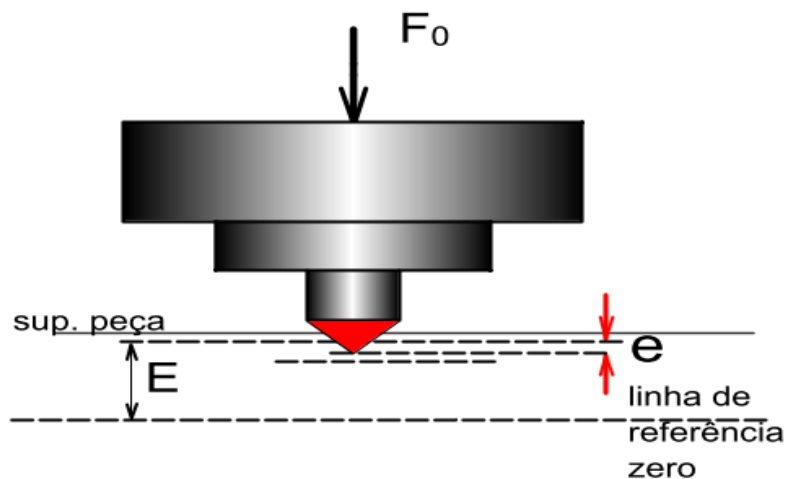
A norma brasileira para a realização do ensaio é a NBR ISO 148 - 2, e a norma internacional de maior utilização é a ASTM E10 - 93 [37].

Os testes Rockwell constituem o método mais comum usado para medir dureza porque eles são simples para realizar e não requerem nenhuma habilidade especial [34].

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). 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 [28]. A Figura abaixo mostra como se determina a dureza Rockwell.

Figura 18 – Ilustração de um ensaio de dureza Rockwell (HR).

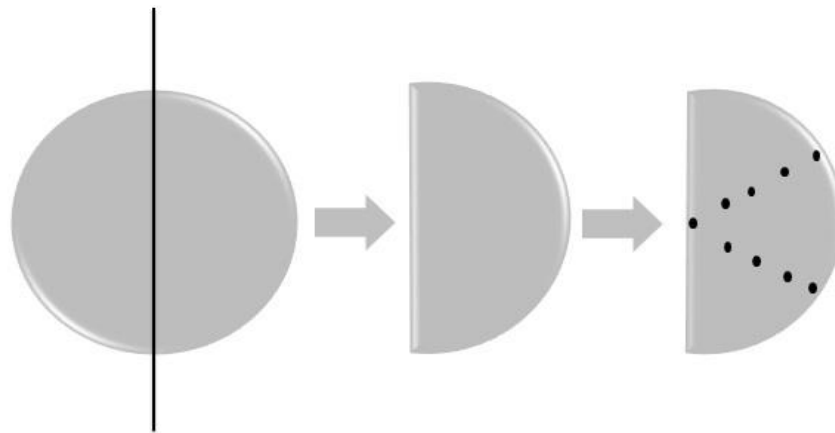


Fonte: [36]

No Brasil, a norma para este tipo de ensaio é a ABNT NBRNM146-1 (1998) Materiais metálicos - Dureza Rockwell -Medição da dureza Rockwell (escalas A, B, C, D, E, F, G, H e K) e Rockwell superficial (escalas 15N, 30N, 45N, 15T, 30 T e 45 T) e calibração de equipamento [36].

Neste trabalho o ensaio de dureza foi realizado numa região próxima a base do lingote por apresentar maior homogeneidade dos grãos. Foram realizadas 10 indentações divididas em duas colunas com orientação do centro para a extremidade da peça. Nesse ensaio foi utilizada uma carga de 100 kgf num tempo de 10 segundos. O esquema da abaixo mostra como se executou o ensaio de dureza.

Figura 19 – Esquema para realização do Ensaio de dureza



Fonte: [Autor, 2017]

3.10. CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRACÇÃO CONVENCIONAL

A existência de relações que permitam converter dureza em tensão é útil em situações em que é necessária uma estimativa da resistência de um material e não se dispõe de uma máquina de ensaio de tração, ou quando a situação é a inversa. Existem relações experimentais que, embora não sejam necessariamente precisas, constituem ferramentas úteis nesse sentido, como por exemplo a relação entre dureza Brinell e limite de resistência à tração [24].

$$\sigma_{\mu} = \alpha \times HB \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

σ_{μ} = limite de resistência à tração (MPa);

α = constante experimental.

A Figura 20 apresenta os valores da constante experimental (α) para alguns materiais de engenharia.

Para durezas Brinell maiores que 380, a relação não deve ser aplicada, pois a dureza passa a crescer mais rapidamente do que o limite de resistência à tração. De qualquer forma, é importante ressaltar que os valores determinados pela Eq. 1 são considerados apenas valores aproximados, devendo ser indicados os valores de dureza adotados [24].

Figura 20 – Tabela com valores experimentais de A para alguns materiais

Material	A
Aço-carbono	3,60
Aço-carbono tratado termicamente	3,40
Aços-liga tratados termicamente	3,30
Latão encruado	3,45
Cobre recozido	5,20
Alumínio e suas ligas	4,00

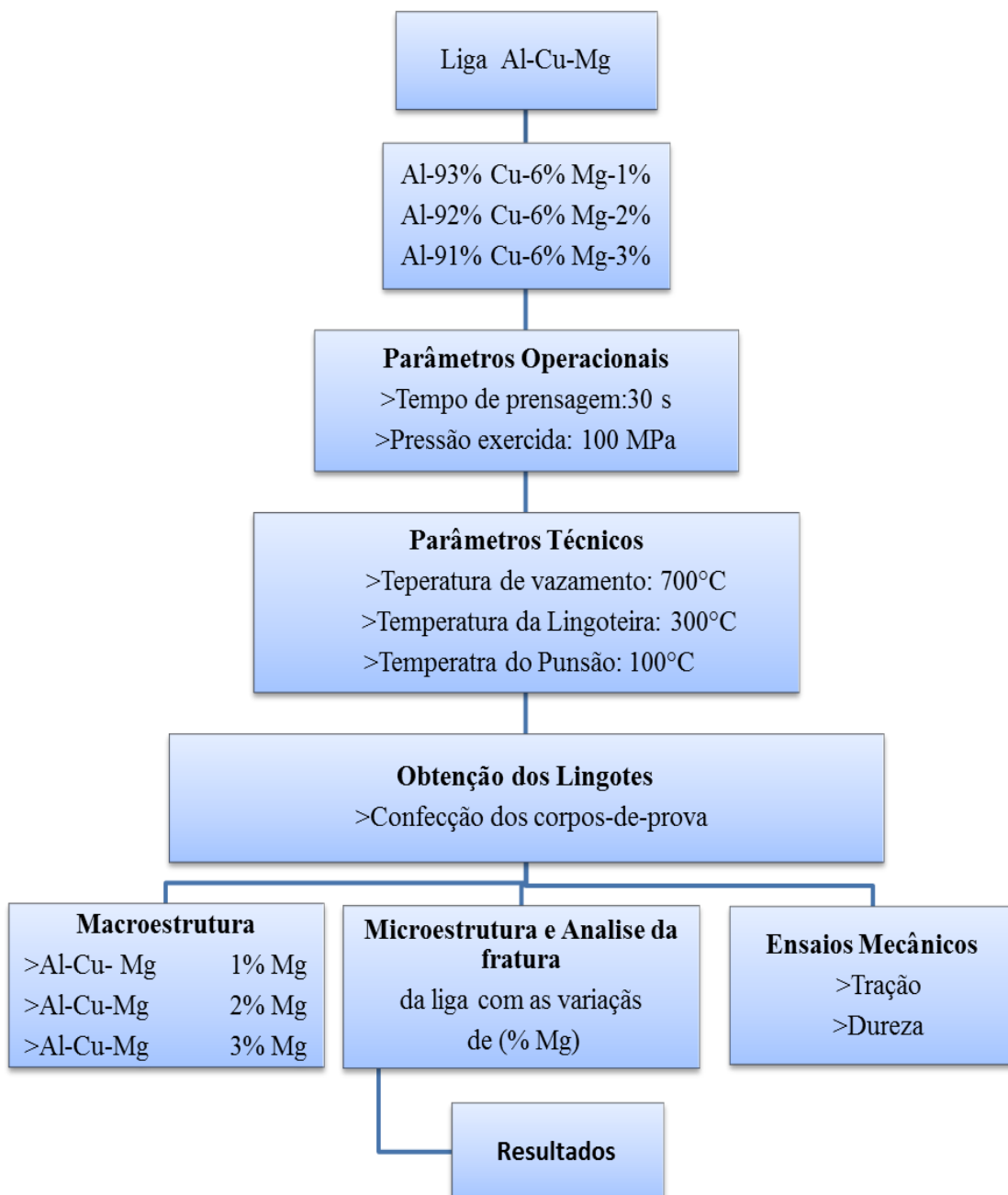
Fonte: [37]

4. METODOLOGIA

4.1. ANALISE EXPERIMENTAL

Para a realização deste trabalho experimental, adotou-se um planejamento conforme o fluxograma abaixo.

Figura 21 – Fluxograma do Procedimento Experimental



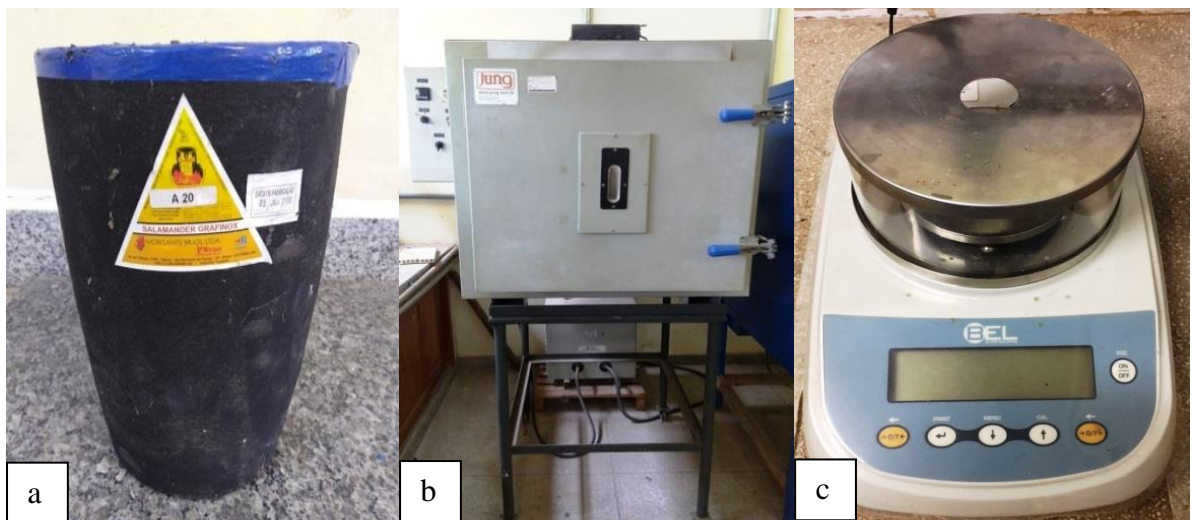
4.2. MATERIAIS

A seguir será apresentado a relação dos equipamentos envolvidos na execução experimental no processo de *Squeeze Casting*.

4.2.1. 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.
- **Balança analítica**, marca Marte com precisão de três dígitos.

Figura 22 - (a) Cadinho de carbetto de silício, (b) Forno elétrico utilizado na fusão das ligas e (c) Balança digital utilizada para pesagem dos materiais para obtenção das ligas.



Fonte: [Autor, 2017]

4.2.2. Acessórios e Equipamentos Para Controle das Temperaturas

- **Termopares:** termopares de diâmetro ($\approx 1,5$ mm) do tipo K para temperaturas de até 1200 °C.
- **Sistema de Aquisição de Dados** marca ALMEMO, modelo 2590 com possibilidade de programação da leitura e aquisição dos dados térmicos direta de quatro canais de entrada simultaneamente ao longo do tempo, todos com diferentes escalas de temperaturas e dois canais de saída.
- **AMR-Software**, marca ALMEMO Data-Control, utilizado para acompanhar, registrar e armazenar os dados obtidos pelos termopares durante o processo de solidificação, além de possibilitar uma monitorização “on-line” dos dados medidos.

Figura 23 – Sistema de aquisição de dados, plug-conector e haste de Aço ASTM 1045, utilizados no registro das temperaturas envolvidas nos experimentos (d).



Fonte: [Autor, 2017]

4.2.3. Utensílios Operacionais

- **Haste de aço ASTM 1045**, revestida com suspensão à base de alumina para homogeneização do banho por agitação.
- **Garra metálica**, utilizada para introduzir e/ou retirar os cadinhos de dentro do forno durante as operações de vazamento do banho de metal líquido no molde.
- **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.

Figura 24 - Perfil da Lingoteira de aço 1045 e Prensa hidráulica semi-automática utilizada



Fonte: [Autor, 2017]

4.2.4. Equipamentos para as análises experimentais.

- **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 (HR_B).
- **Máquina Universal de Ensaios Mecânicos** da marca Kratos utilizada para realização dos ensaios de tração utilizada para realização dos ensaios de tração. EDS da marca Mics, modelo SwiftED 3000.

Figura 25 - Microscópio óptico com interface digital (e); Microduromêtro (f), Máquina de Ensaios mecânicos e (g) EDS (h)



Fonte: [Autor, 2017]

4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento consistiu na obtenção da liga fundindo o alumínio com utilizando-se um cadinho a um superaquecimento de 800°C para fornecer energia suficiente para a fusão e homogeneizado do alumínio, posteriormente, adicionou-se os elementos de liga (Cu e Mg), para fusão total e completa homogeneização dos elementos.

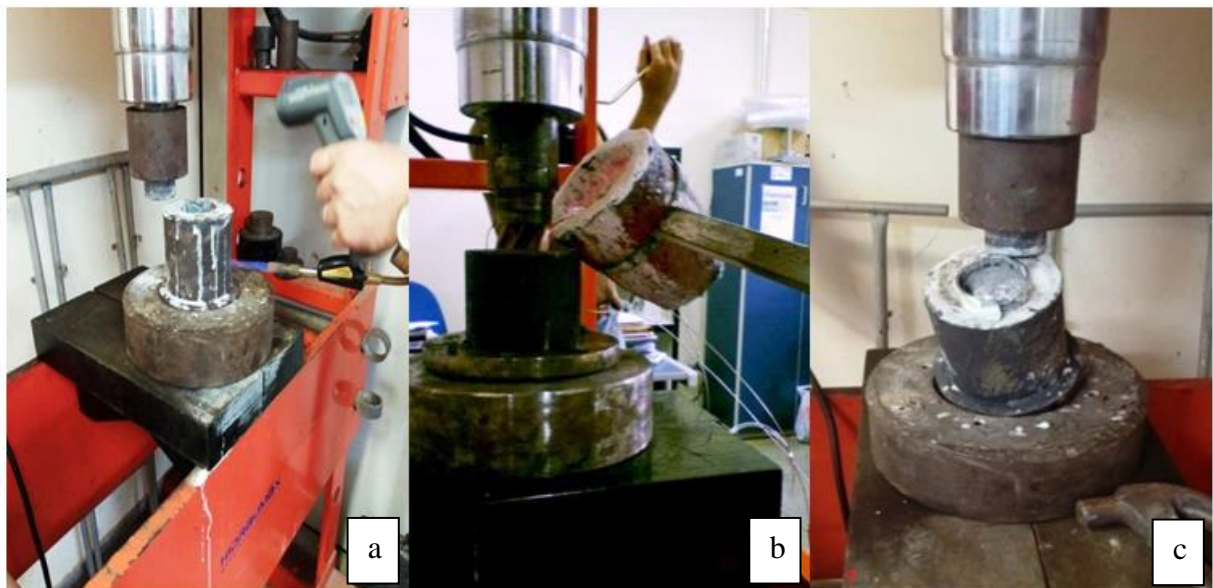
Figura 26 – Entrada do cadinho no forno aquecido e aferimento da temperatura da liga



Fonte: [Autor, 2017]

A lingoteira foi pré-aquecida a uma temperatura de 300°C e mantendo esta temperatura com o uso de um maçarico, o metal líquido foi vazado na lingoteira e aplicou-se a pressão devida, a temperatura de vazamento foi de 680°C, para o punção adotou-se 100°C de temperatura, o controle da temperatura foi feito por meio de uso de termopar. O tempo de pressão aplicado logo a após o vazamento do metal na lingoteira foi de 30 segundos.

Figura 27 - Manutenção da temperatura (a), Vazamento (b) e Lingote pronto (c)



Fonte: [Autor, 2017]

4.4. ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Para as análises macro e micrográficas dos lingotes foram utilizadas 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, 5, 3 e 1 Microns. A macroestrutura foi revelada com ataque do reagente químico Keller's (15 ml HF; 15 ml HNO₃; 45 ml HCl e 25 ml H₂O).

Na análise microestrutural, as amostras foram retiradas de cada lingote polido para então serem levadas 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.

Um EDS (Energy Dispersive X-ray) Modelo SwiftED3000 acoplado a um Microscópio Eletrônico de Varredura Modelo HITACHI TM 3000, foi utilizado para análise da composição química qualitativa de cada amostra.

Figura 28 – Máquina Politriz



Fonte: [Autor, 2017]

4.5. EDS

Utilizou-se o MEV e EDS para identificação dos componentes presentes no material estudado, ou seja, para uma análise química da liga estudada.

Essa análise química é um conjunto de técnicas laboratoriais que são utilizadas para identificação das espécies químicas envolvidas em uma reação de queima, como também a quantidade dessas espécies. Assim, foi feita uma determinada amostra que permite determinar quais são os elementos químicos e quanto há de cada elemento no material em estudo. Através da curva de calibração foram necessárias amostras padrão de calibração, contendo muito similares àquelas das amostras a serem analisadas com proporções conhecidas e variadas. O método requer que ao menos um pico característico para cada fase seja bem isolado, e que o número de amostras de calibração seja igual ou exceda o número de fases envolvidas. Foram feitas aferições em regiões distintas das amostras para efeito comprobatórios da proporcionalidade dos elementos da liga.

Quando não há a necessidade de padrão interno, as curvas de calibração obtidas se compõem da direta correlação de contagem de pulsos no pico característico com a proporção da fase na amostra. Neste caso, cresce exponencialmente em importância a preparação cuidadosa e padronizada das amostras para análise.

4.6. DUREZA

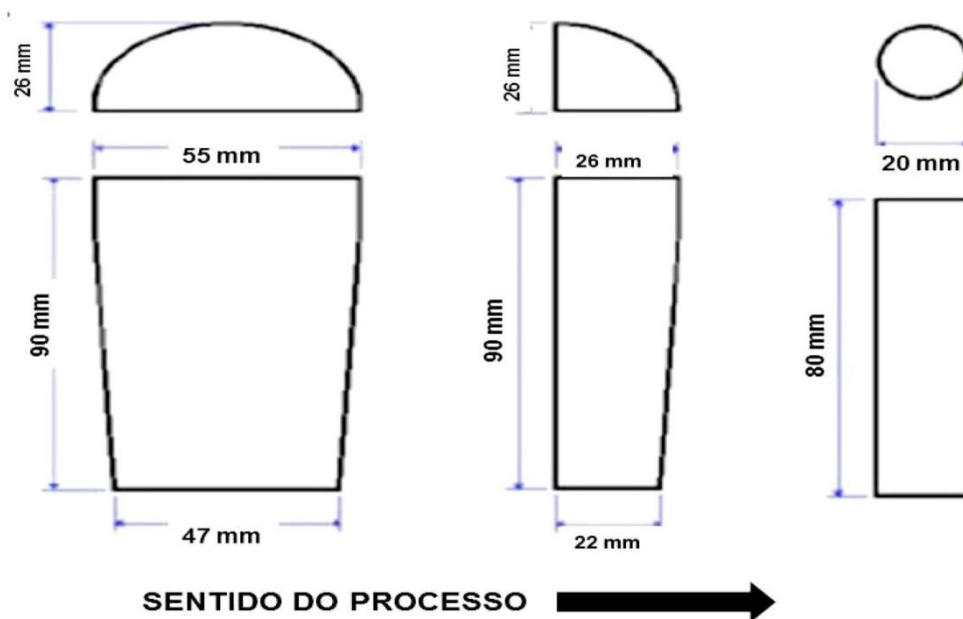
Para a aferição da dureza na amostra foi realizado lixamento e limpeza ao longo da peça, logo após foi realizado o ensaio de dureza com dez indentações em cada amostra, sendo estas feitas do centro para a borda da peça para coleta e elaboração da média estatística.

As medições foram feitas com o durômetro de bancada PANTEC, as médias foram realizadas na escala Rockwell B (HR_B), e convertidas posteriormente para escala Brinell.

4.7. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para a medição do limite de resistência à tração foram produzidos os corpos de prova usando as metades dos lingotes cortados, para cada metade foi feito um corpo de prova. A metade do lingote foi serrada ao meio longitudinalmente e usando uma dessas metades foram feitos os corpos de prova, como é mostrado esquematicamente na a baixo.

Figura 29 – Esquema para produção dos corpos de prova a partir da usinagem em torno mecânico



Fonte: [Autor, 2017]

As Figuras 30 e 31 mostram o lingote após processo de corte antes de ser usinado nas dimensões corretas para a finalização dos corpos de prova de tração.

Figura 30 – Lingotes inteiros e visão do corte feito longitudinalmente para usinagem dos corpos de prova.



Fonte: [Autor, 2017]

Figura 31 – Corte feito no lingote para confecção dos corpos de prova



Fonte: [Autor, 2017]

Os corpos de prova foram produzidos seguindo as dimensões proporcionais da norma ASTM E 8M – 038M – 03 Métrico, 2001, como mostra a baixo.

Figura 32 – Dimensões proporcionais recomendadas. 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: [33]

A figura abaixo mostra os corpos de prova já usinados e prontos para serem ensaiados. Os ensaios foram realizados na máquina de tração, com a célula de carga de 30 KN.

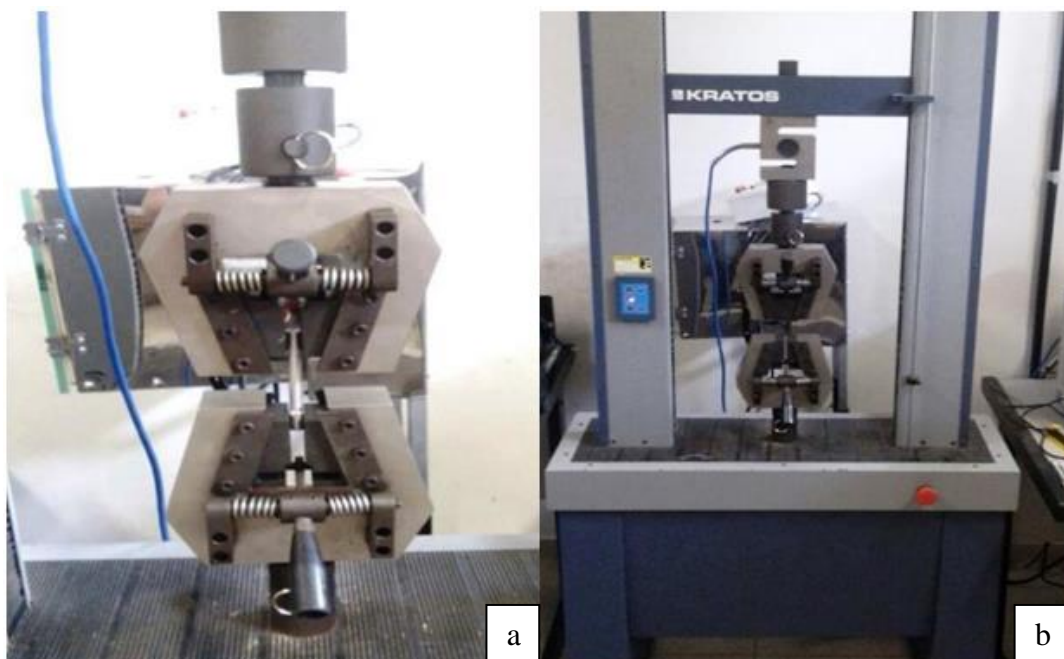
Figura 33 – Corpos-de-prova para o ensaio de tração.



Fonte: [Autor, 2017]

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 fixa na máquina a foi deformada por aplicação de carga. Esse processo pode ser visto na figura abaixo.

Figura 34 - Visão aproximada da garra que acopla o corpo de prova (a) e corpo de prova posicionado na máquina de ensaios (b).



Fonte: [Autor, 2017]

5. RESULTADOS E DISCUSÕES

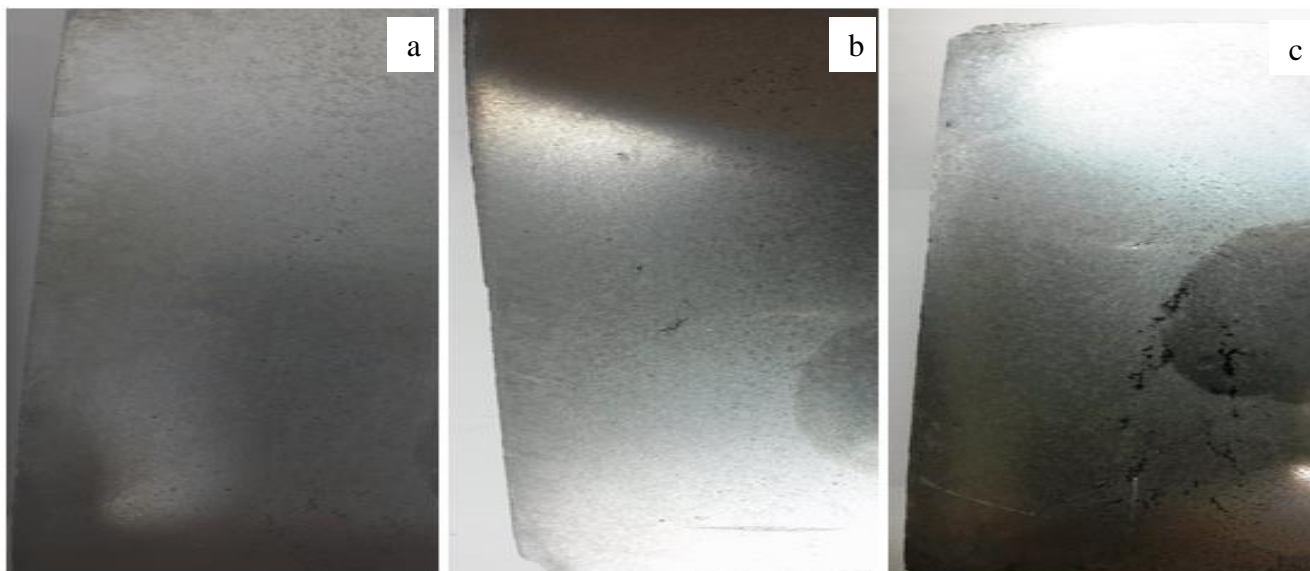
A análise dos resultados obtidos através da fundição pelo processo *squeeze casting*, de análise química semiquantitativa, ensaio de tração, dureza e Metalografia, e análise da fratura dos corpos de prova serão mostrados e discutidos a seguir.

5.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL

5.1.1. Análise da liga Al-Cu-Mg

Os lingotes com composição 1, 2 e 3% de Mg apresentaram a ocorrência de macrosegregação, estas são normais, decorrentes de uma rápida velocidade de solidificação sofrida pela liga, possivelmente devido à excessiva pressão oferecida, ocasionando um aumento instantâneo do ponto de fusão, maior contato entre metal/molde e aumentando também a taxa de transferência de calor o que diminui o intervalo de solidificação. Com maior velocidade na transformação líquido/sólido o que acaba em não possibilitar um possível deslocamento gravimétrico da segregação. A figura (35), mostra a macroestrutura obtida pelo lingote após a fundição do material pelo processo de *squeeze casting*. Macroestrutura analisada da liga Al-Cu-Mg.

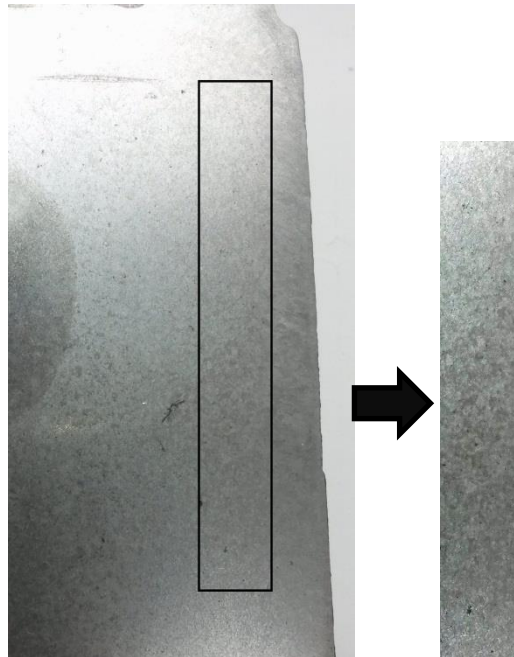
Figura 35 - Macrografia para liga 1% Mg em (a), 2% Mg em (b) e 3% Mg em (c).



Fonte: [Autor, 2017]

As amostras analisadas apresentaram uma estrutura granular equiaxial bastante refinada como estrutura predominante. A elevada pressão aplicada, em torno de 25 toneladas, 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.

Figura 36 – Secção ampliada da macroestrutura do lingote cortado



Fonte: [Autor, 2017]

Nas seções mais espessas da peça, onde existe maior probabilidade de aparecimento de porosidade, a pressão fez com que o metal líquido que se encontrava nos pontos mais quentes fosse deslocado para preencher os poros que estão se formando, isso acabou impedindo o seu desenvolvimento. A Presença de defeitos como poros e defeitos de *Shrinkage* não foram encontrados na macroestrutura da liga.

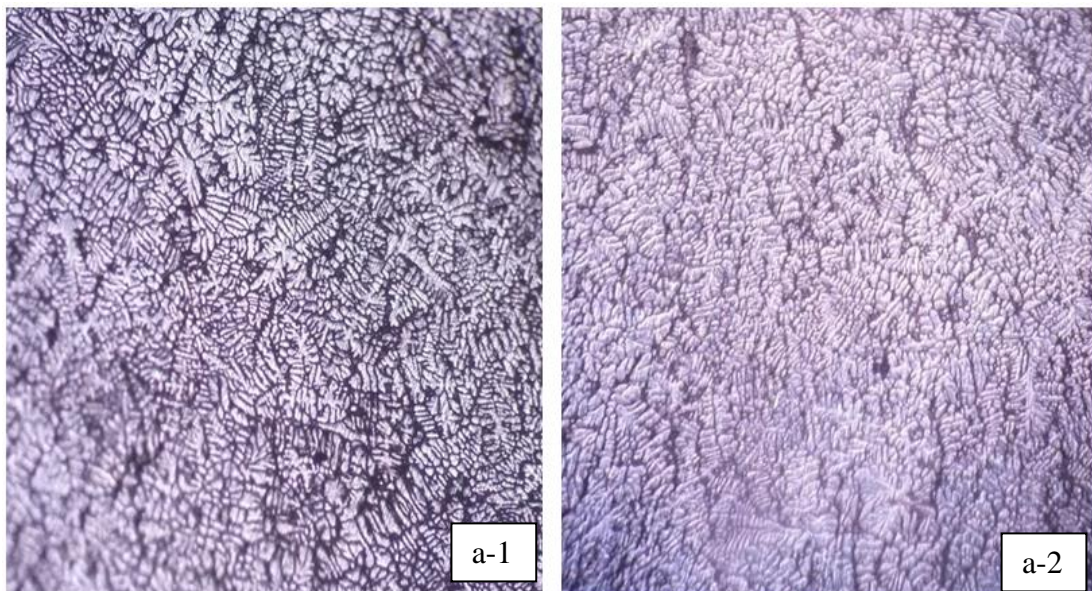
5.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Além da alta densificação, as excelentes propriedades mecânicas obtidas por *squeeze casting* se devem à microestrutura. Em termos de análise microestrutural tem-se que os principais defeitos que vem a ocorrer sejam possivelmente devido a forte tendência de

oxidação das ligas de Alumínio-Cobre - Magnésio, com uma moderada tendência de defeitos de fundição, contração característica do alumínio e a presença de fragmentos exógenos no sistema Fusão/Vazamento da liga [38].

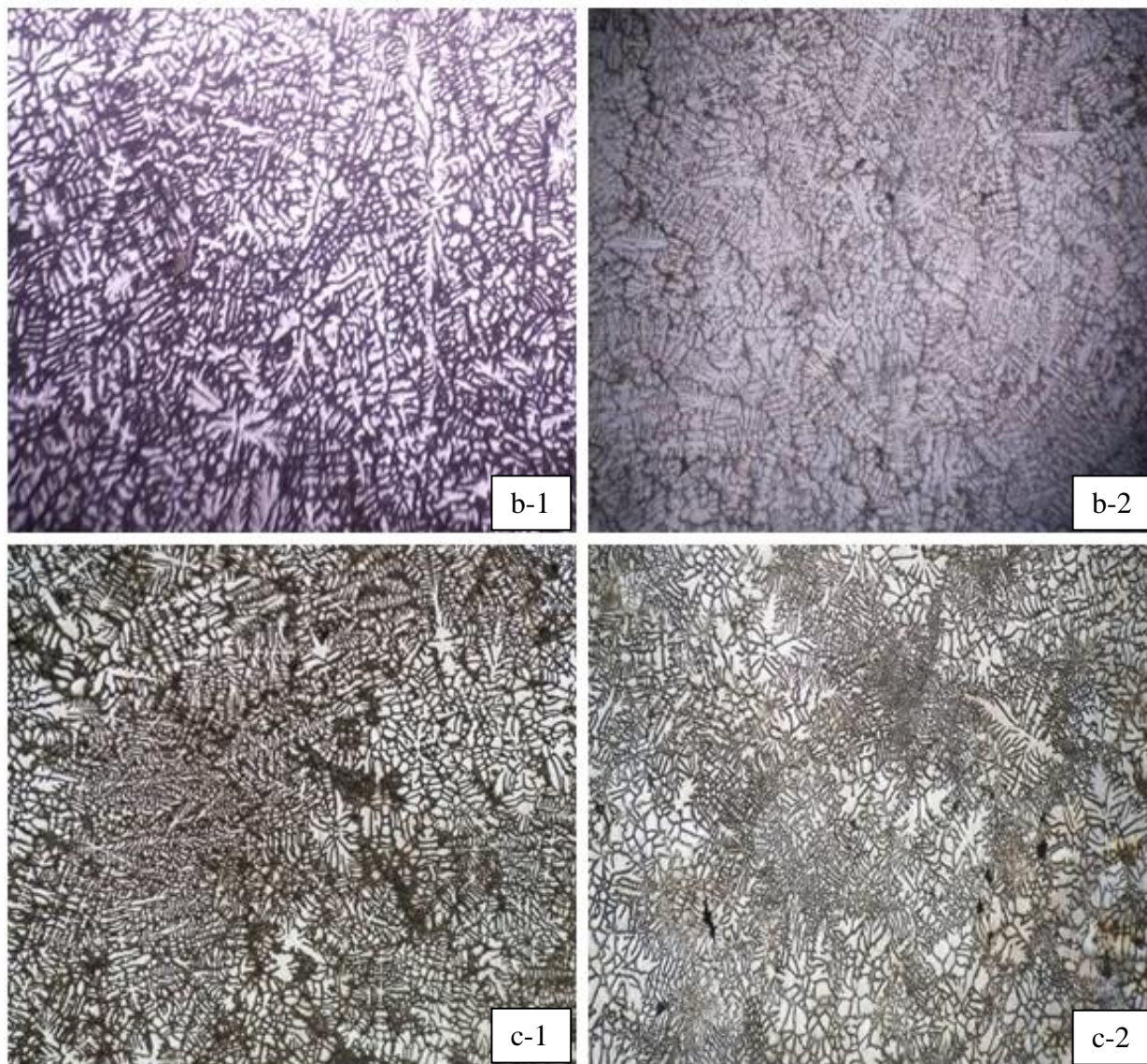
As microestruturas dos lingotes com 1 e 2% de Mg apresentaram um percentual muito pequeno de microsegregações como se pode ver na Figuras-37 (a-1 e a-2 para 1% Mg), Figura-38 (b-1 e b-2), a microestrutura que apresentou um maior número de microsegregações foram as dos lingotes contendo 3% de Mg como pode ser visto na Figura-38 c-2 para 3% Mg). As imagens da metalografia foram analisadas para verificar o arranjo microestrutural da peça após fundição, pois a mesma sofreu alterações em suas características e propriedades.

Figura 37 – Micrografia da liga com 1% de Mg com aumento de 50X



Fonte: [Autor, 2017]

Figura 38 – Micrografia da liga com 2% e 3% de Mg com aumento de 50X



Fonte: [Autor, 2017]

O defeito de microsegregação quando em grandes percentuais causam impedimento do movimento das discordâncias e ocasiona assim fragilidade do metal em sua conformação e aumento da tendência de propagação de trincas e no aumento de tensões. Entretanto como pode se ver pelas microestruturas que estes defeitos foram mínimos e quase nenhuma porosidade presente foi vista pela análise microscópica, a liga fundida apresentou-se bastante homogênea.

Observa-se que a microestrutura da liga obtida por *squeeze casting* é virtualmente livre de poros. O nível de porosidade de estruturas para *squeeze casting* e de é de 0,5% [3]. Foi quase nula a presença de micro porosidades encontradas nas amostras como se pode notar nas

figura 37 para a liga 1% Mg e figura 38 para a liga 2% , observando-se uma maior presença deste defeito na figura (39) para a liga 3% Mg . Isto possivelmente não vem a afetar na resistência mecânica das amostras mesmo sendo acumuladores de tensão e elevarem a tendência de propagação de trincas da liga, pois a quantidade encontrada foi muito pequena.

Esta pequena presença de micro porosidades pode ter vindo a ocorrer devido a uma serie de fatores, tais como: a forte tendência de oxidação do Magnésio; a não utilização de atmosfera controlada; temperatura de vazamento insuficiente para a composição, esta vindo a não proporcionar tempo suficiente para liberação de todos os gases com a aplicação de pressão; e ainda a baixa temperatura da Lingoteira.

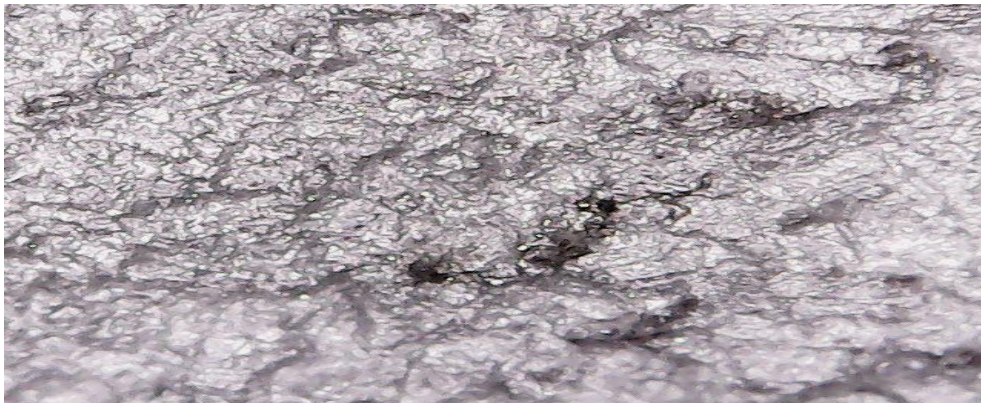
Nota-se que para o caso das ligas Al-Cu, os espaçamentos celulares e dendríticos, aumentam à medida que a posição se afasta da interface metal/molde. As condições que determinam esse aumento são dadas pelos parâmetros térmicos, velocidade de deslocamento da isoterma liquidus e da taxa de resfriamento, que diminuem progressivamente para posições mais distantes da superfície do lingote, isso se dá por conta da resistência térmica crescente da camada solidificada.

5.3. ANALISE DA FRATURA

Existem 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.

As fraturas apresentadas após o ensaio de tração nos corpos de prova da liga foram totalmente frágeis. 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 transgranular ou granularmente com estrição mínima ou nula. As fraturas apresentaram aspecto cristalino e o rompimento dos corpos de prova deram-se de forma planar. As figuras abaixo demonstram o brilho característico da fratura frágil, aspecto granular e algumas microsegregações.

Figura 39 – Imagem da fratura após ensaio de tração, liga com 1% Mg, aumento 1000 X



Fonte: [Autor, 2017]

Figura 40 - Imagem da fratura após ensaio de tração, liga com 2% Mg, aumento 1000 X.



Fonte: [Autor, 2017]

Figura 41 – Imagem da fratura após ensaio de tração, liga com 3% Mg, aumento 1000 X



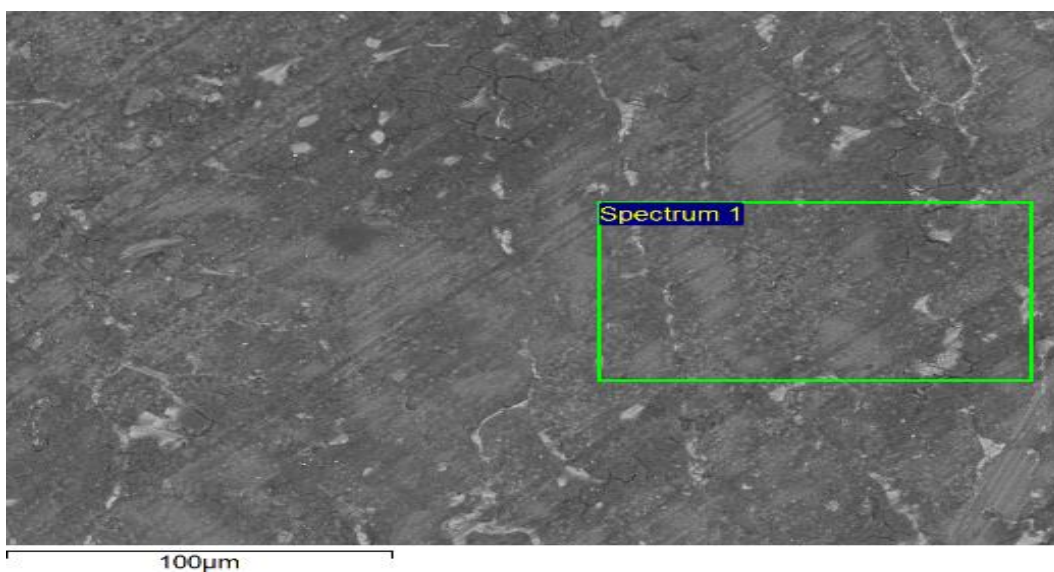
Fonte: [Autor, 2017]

5.4. ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas da liga Al-Cu-Mg, foram coletadas por meio de EDS nas amostras de três lingotes com (1%,2% e 3% de Mg).

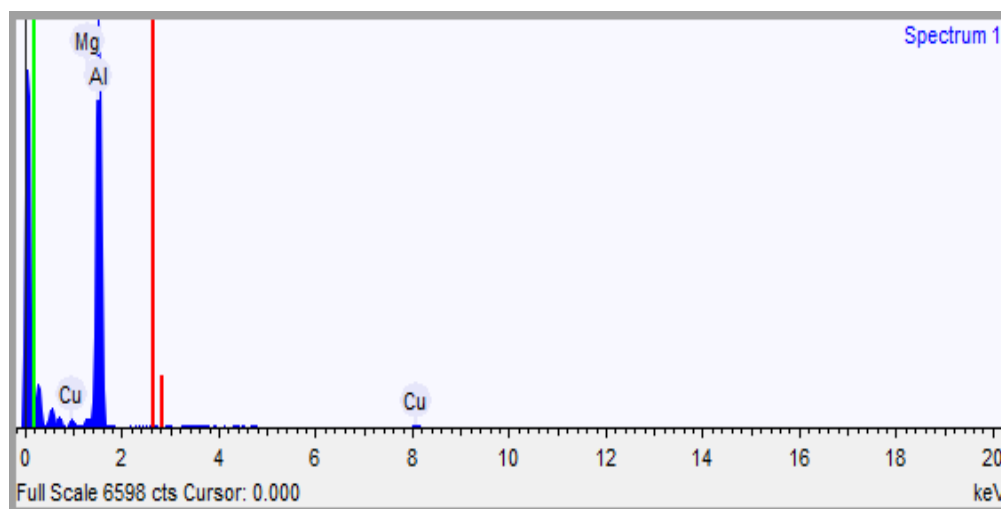
A análise foi realizada em amostras retiradas de diferentes pontos de cada lingote, a partir de então analisadas. Após as análises obtidas, observou-se que a composição da liga estava em conformidade para todos os percentuais apresentados. Al-6%Cu-1%Mg, Al-6%Cu-2%Mg, Al-6%Cu-3%Mg, conforme as figuras abaixo.

Figura 42 – Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-1%Mg.

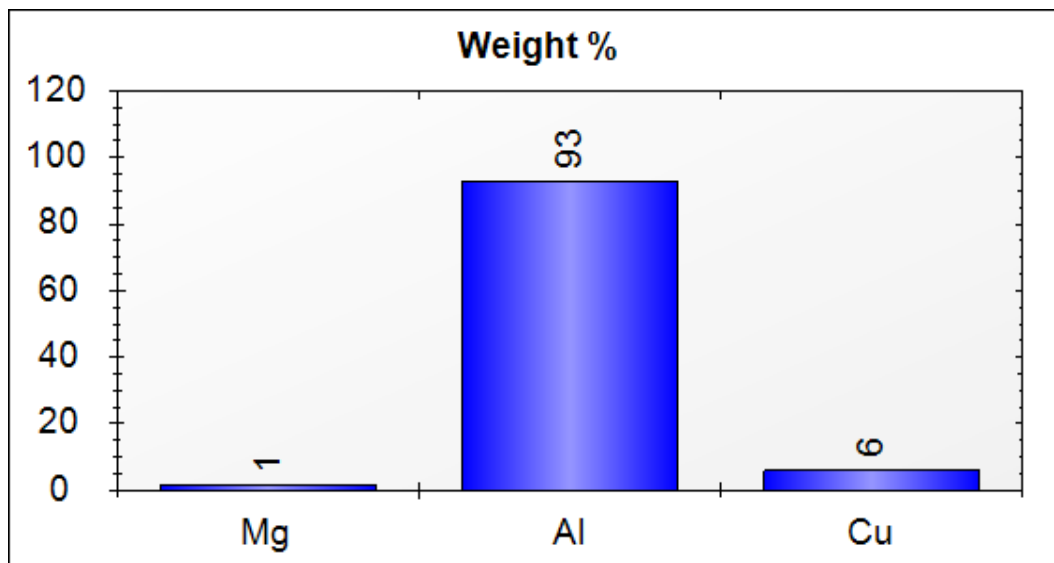


Fonte: [Autor, 2017]

Figura 43 – Espectrômetro da Liga Al-6%Cu-1%Mg



Fonte: [Autor, 2017]

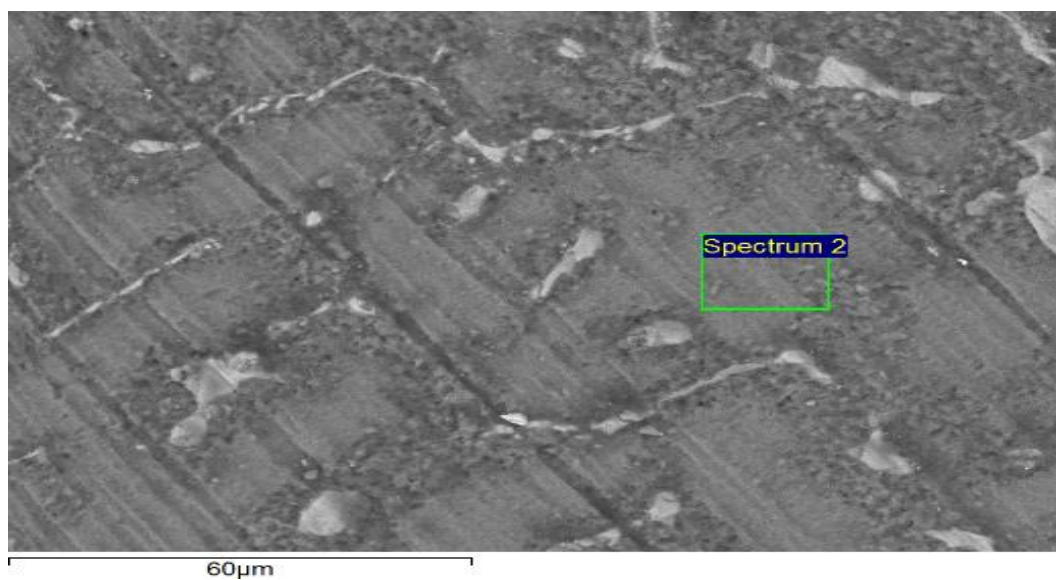
Figura 44 – Análise Química da liga Al-6%Cu-1%Mg.

Fonte: [Autor, 2017]

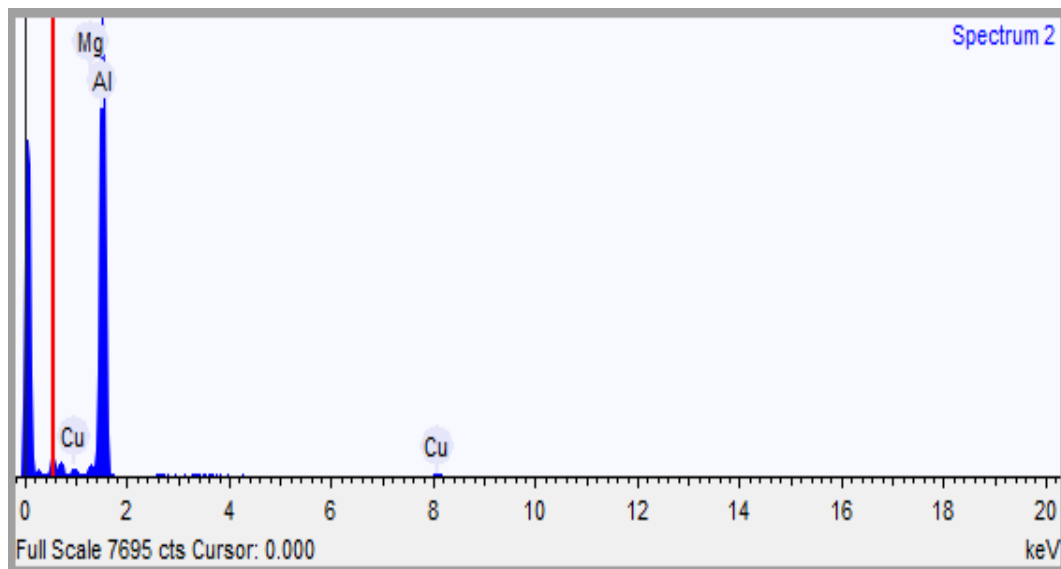
Tabela 1 - – Representação dos Percentuais dos elementos de liga Al-6%Cu-1%Mg

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Magnesium	1.259	0.428	1.444
Aluminum	92.891	0.980	95.989
Copper	5.850	0.904	2.567

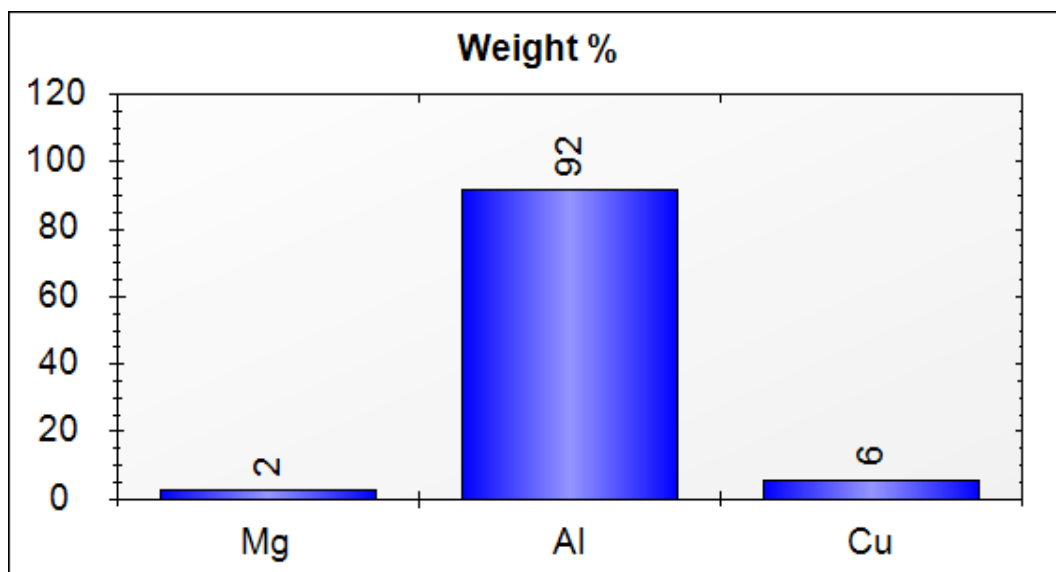
Fonte: [Autor, 2017]

Figura 45 – Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-2%Mg

Fonte: [Autor, 2017]

Figura 46 – Espectrômetro da Liga Al-6%Cu-2%Mg

Fonte: [Autor, 2017]

Figura 47 – Análise Química da liga Al-6%Cu-2%Mg

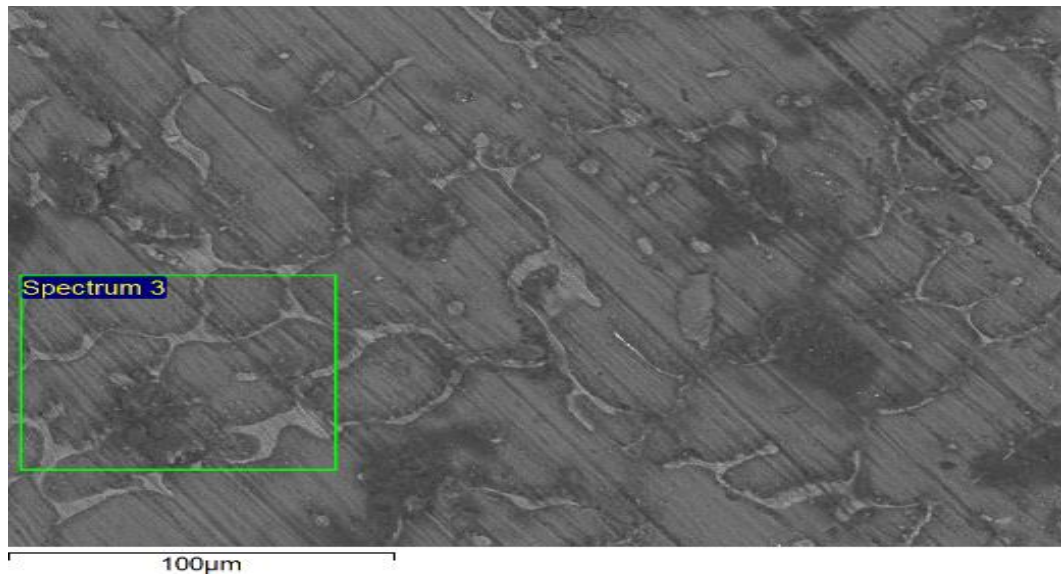
Fonte: [Autor, 2017]

Tabela 1 - Representação dos Percentuais dos elementos de liga Al-6%Cu-2%Mg

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Magnesium	2.273	0.446	2.604
Aluminum	91.802	1.096	94.797
Copper	5.926	1.035	2.598

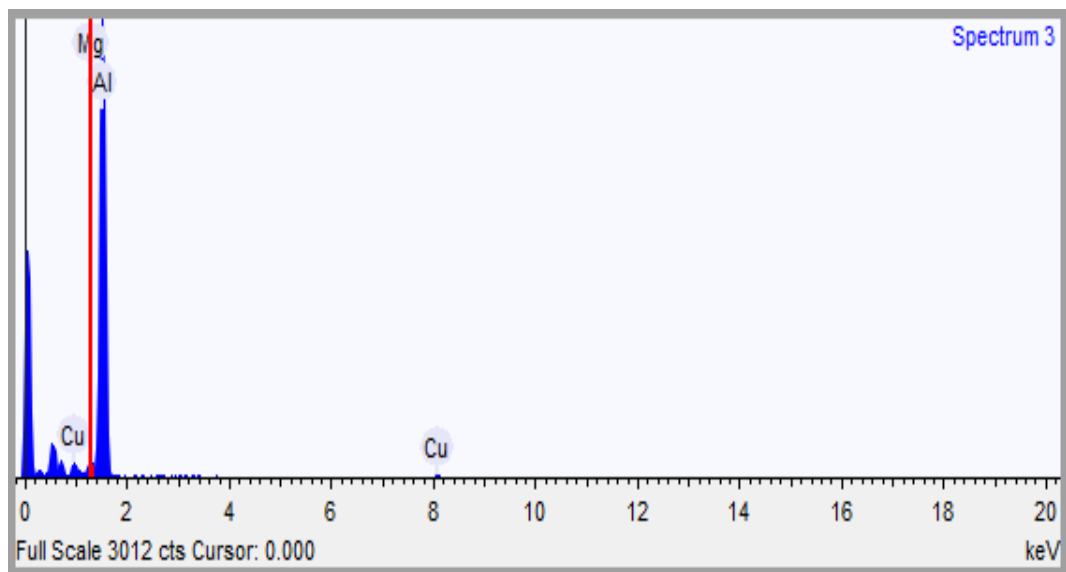
Fonte: [Autor, 2017]

Figura 48 – Imagem de EDS da região analisada para liga Al-6%Cu-3%Mg.

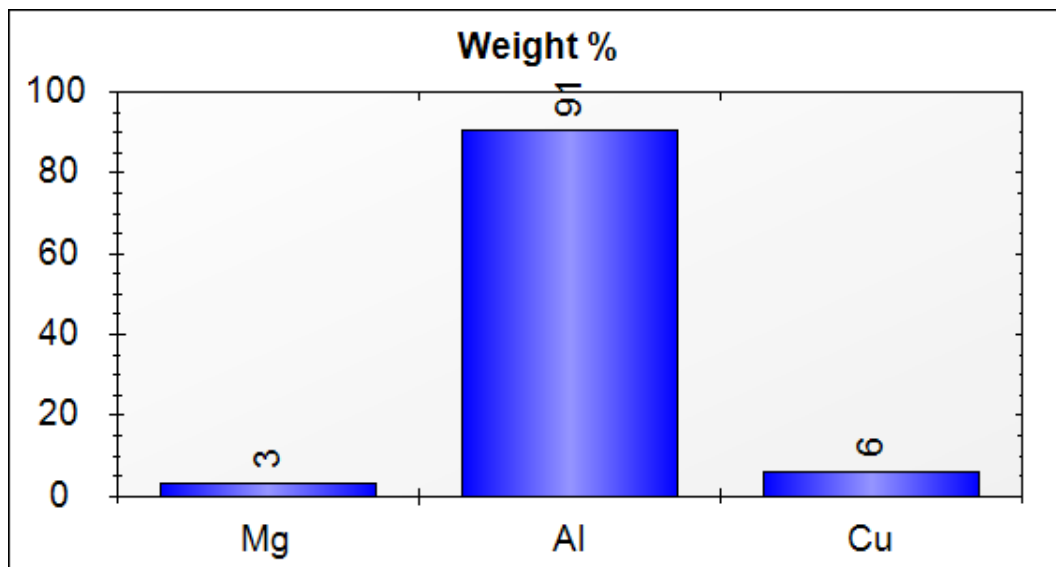


Fonte: [Autor, 2017]

Figura 49 – Espectrômetro da Liga Al-6%Cu-3%Mg



Fonte: [Autor, 2017]

Figura 50 - Análise Química da liga Al-6%Cu-3%Mg

Fonte: [Autor, 2017]

Tabela 2 - Representação dos Percentuais dos elementos de liga Al-6%Cu-3%Mg

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Magnesium	3.318	0.295	3.802
Aluminum	90.586	0.735	93.525
Copper	6.096	0.703	2.673

Fonte: [Autor, 2017]

5.5. ANÁLISE DE DUREZA

Segue abaixo os resultados referentes as médias e os desvio padrão médio de dureza para cada lingote fundido nas tabelas e no gráfico a baixo são apresentados os valores de dureza e o gráfico comparativo das e do desvio padrão médio para cada percentual da liga estudada.

Tabela 3 – Valores de dureza, média e desvio padrão médio para o lingote 1% Mg

CORPO DE PROVA 1% Mg	VALORES DE DUREZA (Brinell)
1	68
2	71
3	70
4	72
5	70
6	73
7	72
8	71
9	68
10	72
MÉDIA	70,7
DESVIO PADRÃO	1,70

Fonte: [Autor, 2017]

Tabela 4 – Valores de dureza, média e desvio padrão médio para o lingote 2% Mg

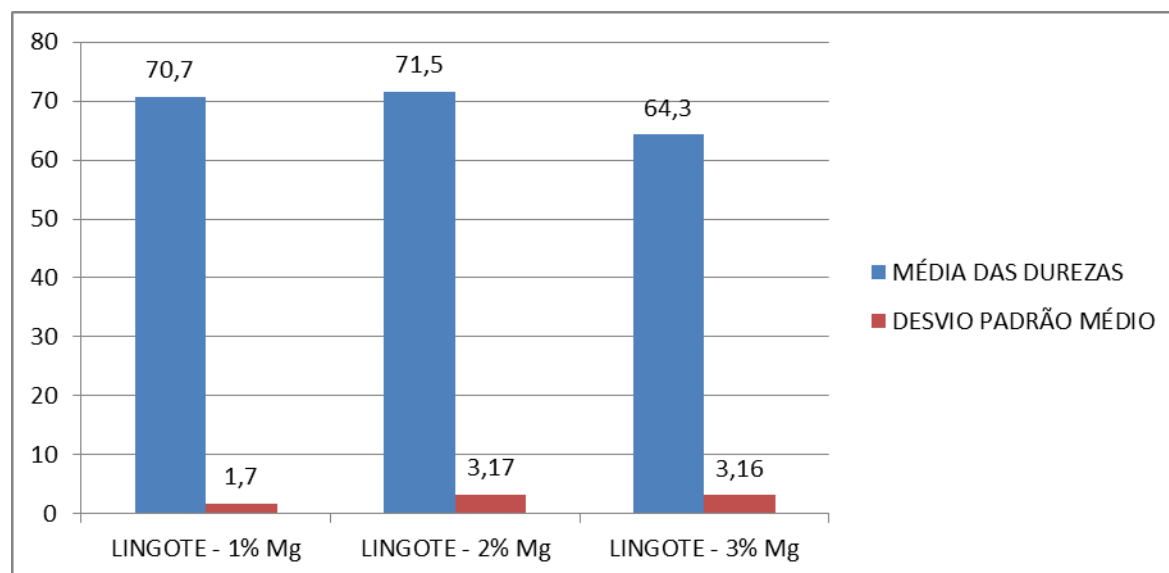
CORPO DE PROVA 2% Mg	VALORES DE DUREZA (Brinell)
1	76
2	75
3	68
4	74
5	71
6	70
7	68
8	73
9	67
10	73
MÉDIA	71,5
DESVIO PADRÃO	3,17

Fonte: [Autor, 2017]

Figura 51 – Valores de dureza, média e desvio padrão médio para o lingote 3% Mg.

CORPO DE PROVA 3% Mg	VALORES DE DUREZA (Brinell)
1	61
2	59
3	64
4	60
5	61
6	63
7	61
8	62
9	60
10	61
MÉDIA	61,2
DESVIO PADRÃO	1,47

Fonte: [Autor, 2017]

Figura 52 - Comparação entre as Durezas

Fonte: [Autor, 2017]

A amostra fundida sob pressão apresentou dureza superior do que a média comum de ligas Al-Cu-Mg quando fundidas em processos convencionais, Isso se dá por conta do seu processo de solidificação, a solidificação sob pressão confere ao material uma dureza mais elevada. Segundo MALEKI et. al. 2006, para quaisquer pressões acima de 100 MPa tem-se o

maior/melhor contato entre o metal líquido e as paredes da lingoteira. Ainda para o mesmo autor, mantendo-se a variável pressão constante e variando a temperatura da lingoteira e a temperatura de vazamento do metal, esta primeira exerce maior influência na dureza de ligas metálicas produzidas via processo *Squeeze Casting*.

5.6. LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (LRT)

Após o ensaio de tração, obteve-se os valores dos resultados referentes a cada corpo de prova e do respectivo percentual de liga, ao qual estão representados nas tabelas abaixo, juntamente com a figura de um corpo de prova ensaiado.

Tabela 5 – Valores do ensaio de tração para a liga com Al-6%Cu-1%Mg

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação Máxima (mm/mm)
1	17063,8	10,4	231,79	268,2	2072,1	0,17283
2	13614,3	9,59	159,05	214	1879,1	0,15967
3	17181,5	8,9	247,82	270,1	2170,3	0,14817
4	15975,3	8,3	248,56	251,1	2102,4	0,138
5	16975,6	9,98	214,53	266,8	2161,4	0,16617
6	16372,5	8,82	238,2	257,4	2040,7	0,1465

Fonte: [Autor, 2017]

Tabela 6 – Valores do ensaio de tração para a liga com Al-6%Cu-2%Mg

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação Máxima (mm/mm)
1	17843,48	10,4	223,41	280,48	2112,42	0,166166
2	18078,85	9,72	231,54	284,18	2253,42	0,1161666
3	17343,34	9,29	233,02	272,62	2200,52	0,1545
4	16681,38	9,89	204,17	262,21	2070,12	0,1645
5	17313,92	9,44	224,89	272,16	2206,68	0,157166
6	16137,10	8,64	208,61	253,66	2205,73	0,143666

Fonte: [Autor, 2017]

Tabela 7 – Valores do ensaio de tração para a liga com Al-6%Cu-3%Mg

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação Máxima (mm/mm)
1	16387,17	9,22	202,69	257,59	2187,09	0,153333
2	11407,77	6,22	165,71	179,32	1944,42	0,1035
3	14298,32	7,79	205,65	224,76	2107,08	0,129333
4	12224,18	6,71	182,72	192,15	1954,09	0,111166
5	13011,18	6,88	199,00	204,52	2068,21	0,114333
6	13025,89	7,06	200,47	204,75	2025,04	0,117666

Fonte: [Autor, 2017]

Figura 53 – Corpo de prova ensaiado



Fonte: [Autor, 2017]

Com os resultados obtidos através do ensaio de tração, pode ser obtido os gráficos abaixo mostrando os resultados para o Ensaio de Tração que possibilitou a determinação do Limite de Resistência a Tração (LRT) para as amostras com aplicação de pressão pelo processo *Squeeze Casting*; Ao qual pode-se ser visto a curva característica de cada corpo de prova, ou seja, uma curva representativa do valor médio que são vistas na figura (54 e 55), para a liga 1% Mg, figura (56 e 57), para a liga 2% de Mg e figura (58 e 59), para a liga 3% Mg. Sendo que o ultimo gráfico da figura 60 mostra uma comparação entre todas as médias da liga.

Figura 54 – Gráfico da tensão versus deformação para cada corpo de prova ensaiado da liga Al-6%Cu-1%Mg.

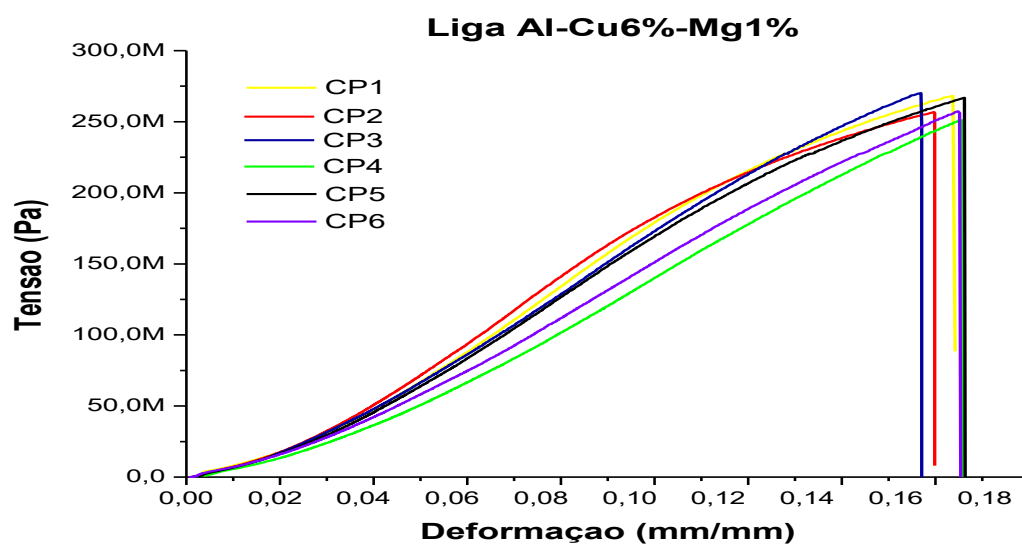


Figura 55 – Gráfico da curva característica, das médias dos corpos de prova para liga com 1% de Mg

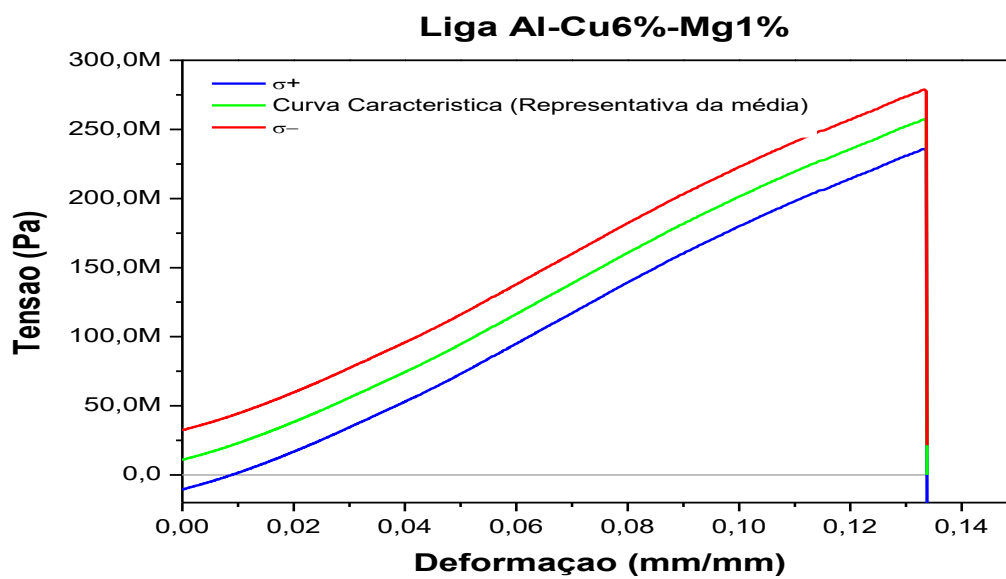
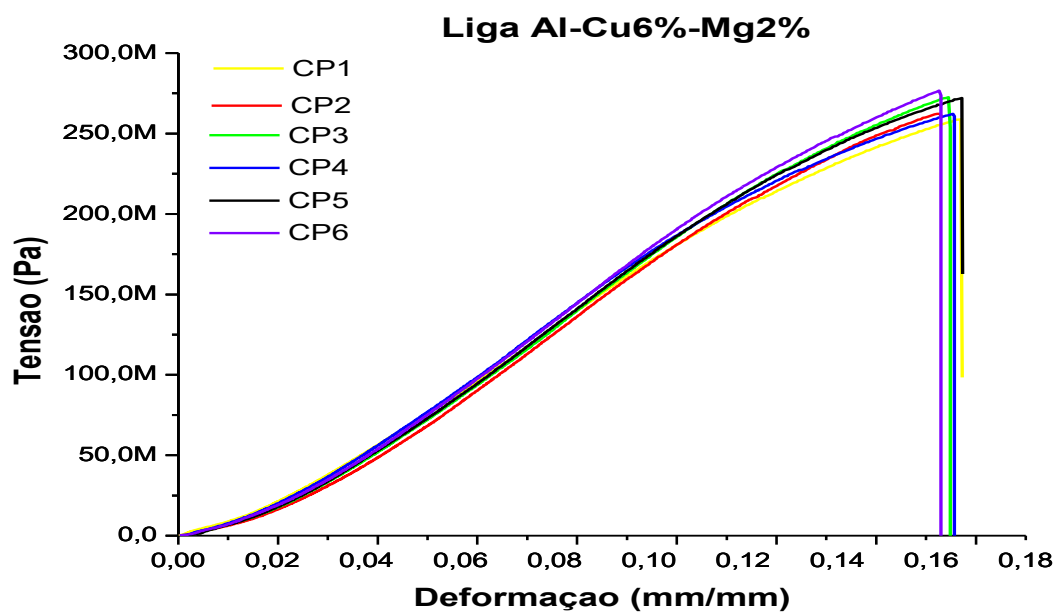
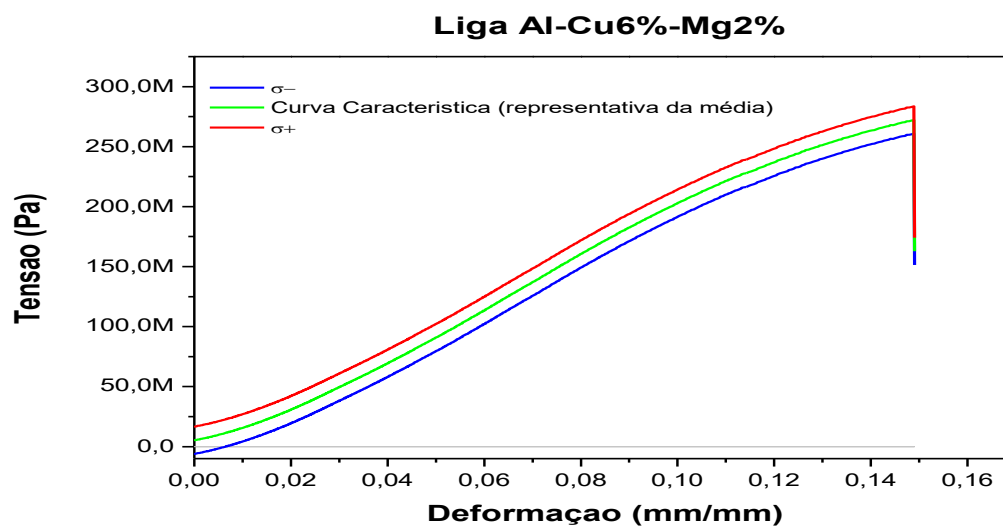


Figura 56 – Gráfico da tensão versus deformação para cada corpo de prova ensaiado da liga Al-6%Cu-2%Mg.



Fonte: [Autor, 2017]

Figura 57 – Gráfico da curva característica, das médias dos corpos de prova para liga com 2% de Mg



Fonte: [Autor, 2017]

Figura 58 – Gráfico da tensão versus deformação para cada corpo de prova ensaiado da liga Al-6%Cu-3%Mg

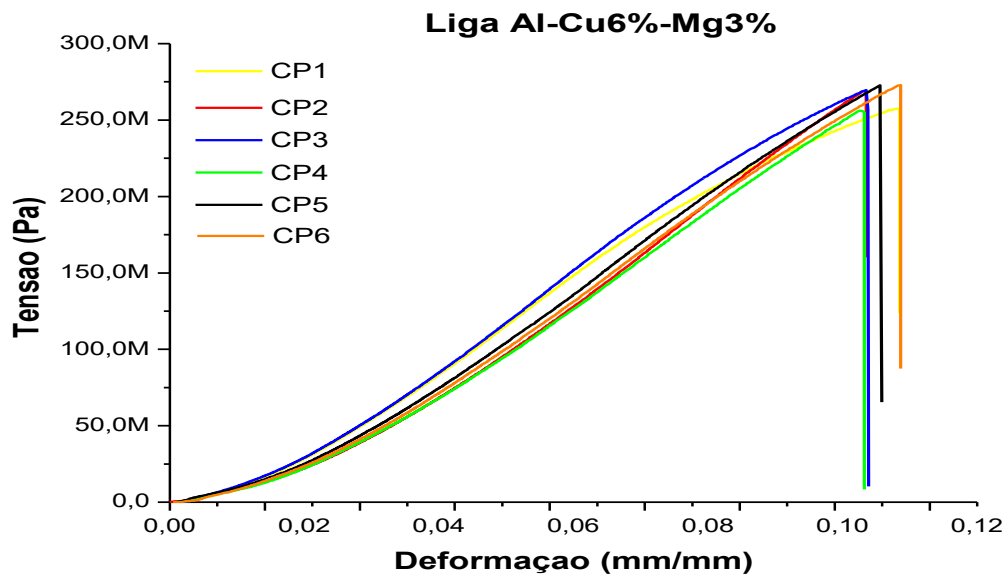


Figura 59 – Gráfico da curva característica, das médias dos corpos de prova para liga com 3% de Mg

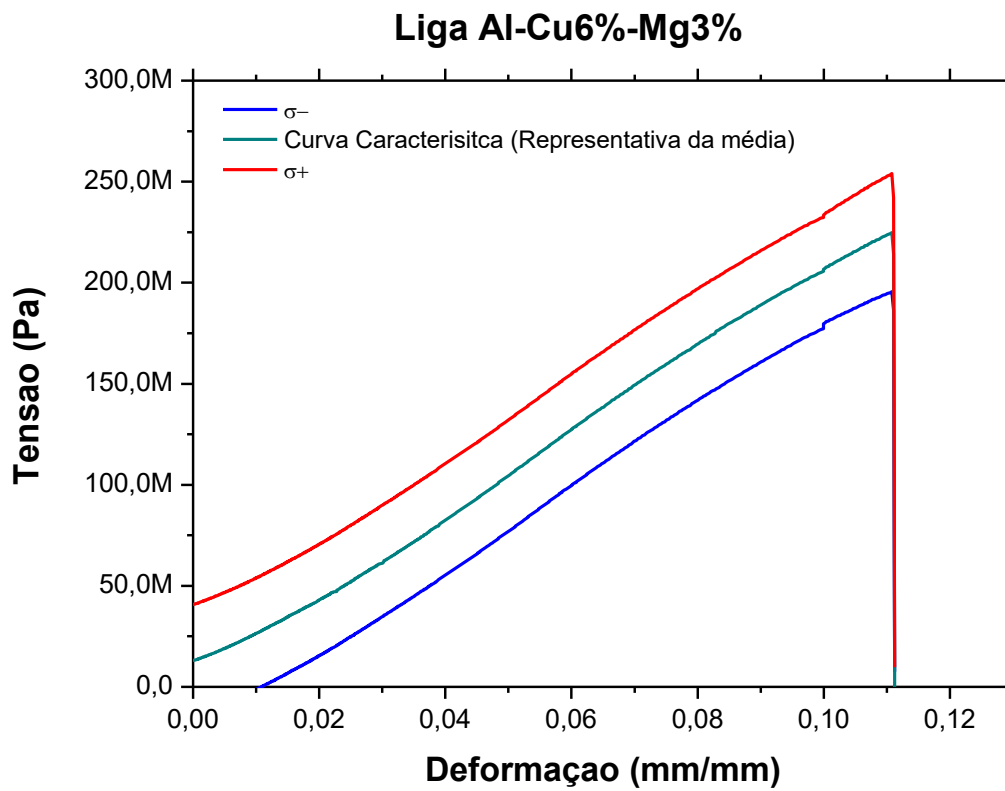
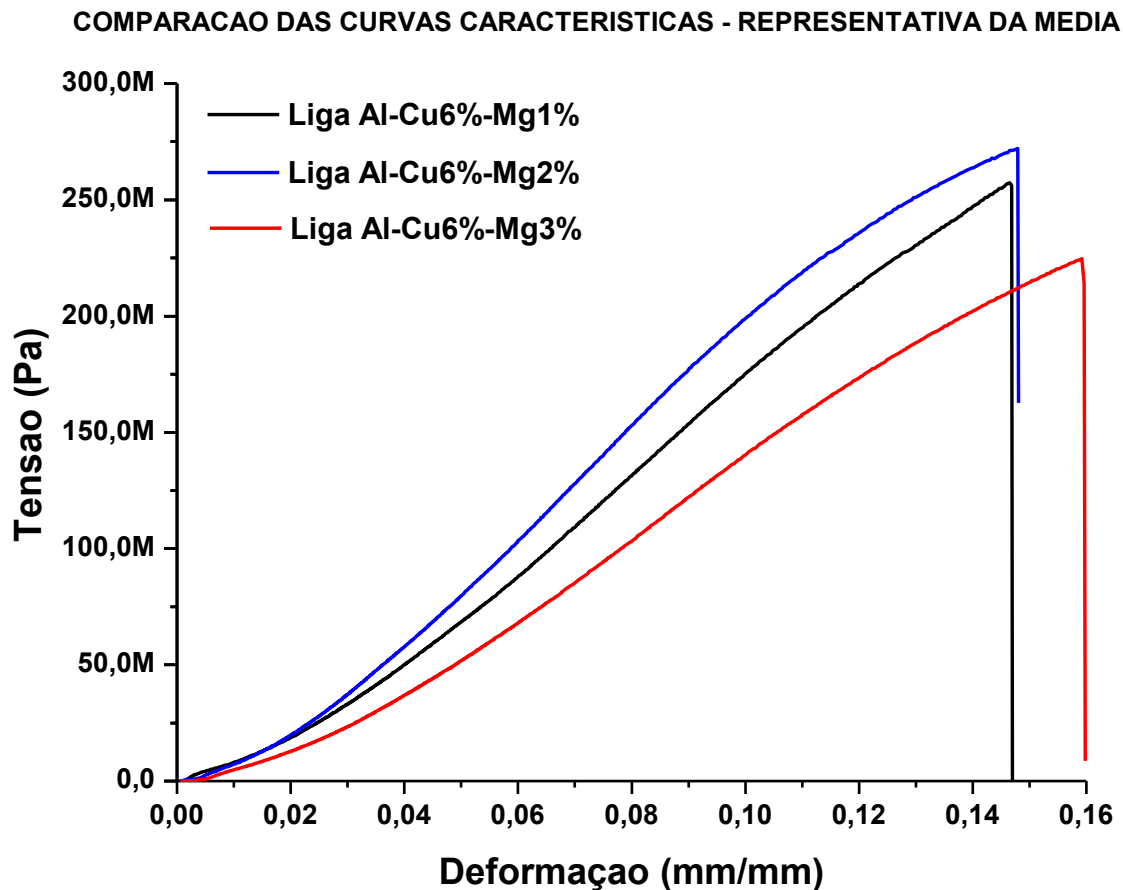


Figura 60 – Gráfico das curvas características, representando a resistência à tração média para todas as composições.



Fonte: [Autor, 2017]

O gráfico da figura (54) mostra o limite de resistência à atração em função da pressão para a liga com (1% de Mg), assim como as figuras 56 e 58 para a liga (2% e 3% Mg) respectivamente, isso para todos os seis corpos-de-prova. De modo geral observa-se que por conta da alta pressão aplicada (100 MPa) o limite de resistência à tração da liga é bastante alto. O gráfico da Figura 61 apresenta a curva característica representativa do valor da médio das curvas, ou seja, escolhe-se dentre as seis curvas qual é a mais próxima do valor médio entre as tensões de cada curva. Juntamente com a curva característica é apresentado desvio padrão no valor de ($\pm 14,7$ MPa para a liga de 1% Mg), ($\pm 8,63$ MPa para a liga de 2% Mg) e ($\pm 20,44$ MPa para a liga de 3% Mg).

5.7. RESULTADO DA CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO CONVENCIONAL

Segundo Zolin (2010), a relação entre dureza e resistência à tração é um dos fatores que faz esse ensaio importante, tornando o Brinell mais confiável.

A resistência à tração é aproximadamente de 4,00 da dureza Brinell para alumínio e suas ligas. A equação a baixo relaciona esse valor com a média obtida. para cada composição da liga estudada. Em seguida obteve-se o gráfico do Limite de Resistência a Tração Experimental pelo Limite de Resistência a Tração obtidos a partir dos valores da dureza Brinell.

Tabela 8 – Composições de liga e valor médio de dureza Brinell

Composições da liga estudada	Valores de dureza Brinell
Liga 1% Mg	70,7 (HR _B)
Liga 2% Mg	71,5 (HR _B)
Liga 3% Mg	64,3 (HR _B)

Fonte: [Autor, 2017]

$$\sigma_{\mu} = \alpha \times HB \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

σ_{μ} = limite de resistência à tração (MPa);

α = constante experimental.

Média de resistência à tração para a liga 1%,2% e 3% Mg.

Para a liga 1%

$$\sigma_{\mu} = 4 \times HB$$

$$\sigma_{\mu} = 4 \times 70,7$$

$$\sigma_{\mu} = \mathbf{282,8 MPa}$$

Para a liga 2%

$$\sigma_{\mu} = 4 \times HB$$

$$\sigma_{\mu} = 4 \times 71,5$$

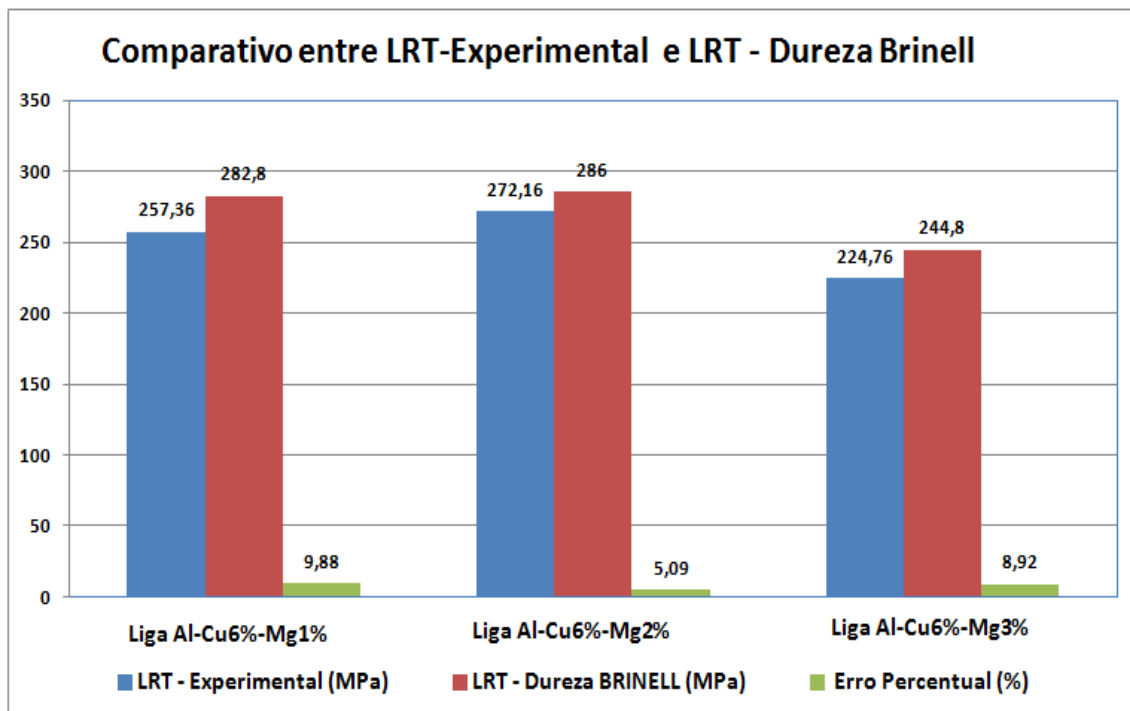
$$\sigma_{\mu} = \mathbf{286 MPa}$$

Para a liga 3%

$$\sigma_{\mu} = 4 \times HB$$

$$\sigma_{\mu} = 4 \times 64,4$$

$$\sigma_{\mu} = \mathbf{257,2 MPa}$$

Figura 61- Gráfico comparativo do LRT experimental e LRT da dureza Brinell

Fonte – [Autor, 2017].

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados através dos ensaios de tração e dureza, análise macro e microestrutural, Pode-se ver uma correlação entre os aspectos de dureza e tração da liga estudada e podemos extrair as seguintes conclusões:

6.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL

A aplicação da pressão de 100 MPa na solidificação da liga refletiu na redução significativa de defeitos e refinamento da estrutura para a composição estudada, isso resultou na eliminação dos defeitos de fundição, tais como: rechupe e defeitos de Shrinkage . Observou-se, na liga, estruturas preferencialmente equiaxiais tendo uma mudança significativa na redução do tamanho médio de grãos e estruturas dendríticas bem definidas.

6.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As peças apresentaram uma estrutura compacta, livre de poros, de granulação fina e quase totalmente equiaxial em comparação com a fundição convencional em coquilha. Observou-se uma discreta presença de micro segregações e micro poros, estes provenientes respectivamente de elementos exógenos devido ao uso de cadinhos de Carbetto de Silício, e a forte tendência de oxidação de ligas de Alumínio – Cobre - Magnésio somado à contração característica do alumínio, o que proporciona o maior surgimento de micro defeitos de fundição.

6.3. ANÁLISE DO LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E DUREZA

Em relação ao limite de resistência a tração, observou-se uma igualdade no limite de resistência à tração quando comparados com outras ligas da mesma série encontradas na literatura, como por exemplo a liga (240,0 F e 242,0 T571). Com relação à dureza foi observado valores em média de 70,7 Brinell, o que indica que a liga trabalhada apresenta uma

dureza alta e pouca ductilidade, o que se deve ao percentual de magnésio adicionado na liga sendo o mesmo o principal responsável por tal propriedade.

6.4. CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRACÃO

A correlação da dureza Brinell e resistência à tração com os valores experimentais de resistência à tração, demonstrou uma grande coerência entre os resultados obtidos no ensaio experimental e o resultado obtido a partir da dureza Brinell, Sendo que para a liga com 1% de Mg o LRT experimental foi de **257,36 MPa** e LRT da dureza Brinell foi de **282,8 Mpa**, para a liga com 2% de Mg o LRT experimental foi de **272,16 MPa** e LRT da dureza Brinell foi de **286 MPa** e para a liga com 3% de Mg o LRT experimental foi de **224,76 MPa** e LRT da dureza Brinell foi de **244,8 MPa**. Ficando o erro percentual, para todas as composições abaixo de 10%. Validando assim, os resultados do ensaio de tração realizado nas ligas estudadas.

REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, J. M. G. de C., Tecnologia da Fundição, Fundação Calouste Gulbenkian, pp. 507-518, 1999.
- [2] Dorcic, J. L. and Verma, S. K., Squeeze Casting, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9 a edition, pp. 323-327, 1988.
- [3] Hu, H., Squeeze Casting of Magnesium Alloys and their Composites, J. Mater. Sci. 33, pp. 1579-1589, 1998.
- [4] Dorcic, J. L. and Verma, S. K., Squeeze Casting, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9 a edition, pp. 323-327, 1988.
- [5] ASM Handbook Castings. Ohio: ASM International, 2008.
- [6] GARCIA, A.; Solidificação: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Editora da Unicamp, 1° ed, p. 117, 2001.
- [7] FERREIRA, J. M. G. de C., Tecnologia da Fundição, Fundação Calouste Gulbenkian, pp. 507-518, 1999.
- [8]- Meza, Elisangela dos Santos ;Modelagem analítica e numérica da solidificação de ligas binárias: análise de fatores de influência / Elisangela dos Santos Meza. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.
- [9]- GOULART, P. R.; Caracterização da Microestrutura de Solidificação de Ligas Al-Fe e Correlação com Propriedades Mecânicas, 2010, Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - São Paulo.
- [10] DIAS, A. C. P. Solidificação de Ligas Eutélicas Livres de PB para Soldagem: Parâmetros Térmicos e Microestrutura, 2009, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - São Paulo.
- [11] BRITO, CRYSTOPHER CARDOSO DE, Influência da Pressão na Modificação Estrutural e Propriedades Mecânicas da liga Al-7%Mg Obtida Através do Processo Squeeze Casting, PA. 2009.
- [12] GARCIA, A.; Solidificação: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Editora da Unicamp, 2007
- [13] GOULART, P.R. Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Hipoeutélicas Al-Si. 2005. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [14] OSÓRIO, W. R. 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.

[15] Garcia ,Amaury ensaios dos materiais [100][200]: Garcia, Amauri; Spim, Jaime Alvares; dos Santos, Carlos Alexandre. Ensaio dos materiais. 2ª Ed. (2012)

[16] Dalcin, Gabrieli Bortoli. Ensaio dos Materiais, Janeiro de 2007.

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

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

[19] GHOMASHCHI MR and VIKHROV A. Squeeze casting: an overview. J Mater Process Technology 2000; 101:1–9.

[20] BRITO, CRYSTOPHER CARDOSO DE, Influência da Pressão na Modificação Estrutural e Propriedades Mecânicas da liga Al-7%Mg Obtida Através do Processo *Squeeze Casting*, PA. 2009.

[21] Dr. Bolfarini Claudemiro e Dr. Kiminami Claudio. PROCESSO DE FUNDIÇÃO “SQUEEZE CASTING”

[22] J.W. MARTIN, “**Precipitation Hardening**”, First Edition Pergamon Press, Oxford, Uk, 1986.

[23] J. E. HATCH. “**Aluminum : Properties And Physical Metallurgy**”. Asm, Metals Park, Usa 1990.

[24]ALUMINIO E SUASLIGAS,www.spectru.com.br.-pdf;2013[acessa em dezembro de 2016].

[25] Metalografia preparação de amostras. Uma abordagem prática. Disponível em <<http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. [Acessado em dezembro de 2016].

[26] O Ensaio Metalográfico. Controle da qualidade. Disponível em <http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf>. Acessado em dezembro de 2016.

[27] CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.

[28]CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7ª. Edição / Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro, 2008.

[29] PANDOLFO, Diogo. Estudo da Tenacidade ao Impacto de um aço SAE 1020 Submetido a Tratamento Térmico. Porto Alegre. Trabalho de Conclusão de Curso, PUCRS, 2009.

- [30] Pinheiro, Lincoln B. L. G. Ensaios de Materiais;Tecnologia dos Materiais II, 23 de setembro de 2010.
- [31] DOS SANTOS, Carlos A.; SPIM, Jaime A; GARCIA, Amauri. Ensaio dos Materiais. Rio de Janeiro, 2008.
- [32] A International Copper Association Latin America
- [33] ROOY, E.L., Introduction to Aluminium and Aluminium Alloys, IN.: American Society for Metals: ASM HandBook, vol 2 – Properties and selection Noferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 10ª edition, pp. 17-39, 1990.
- [34] Jorge Antonio Moura, ATRIBUTOS DO ALUMÍNIO NA ARQUITETURA. Disponível em < jorgeantoniomagalhaesmoura.blogspot.com.br/2012/11/atributos-do-aluminio-na-arquitetura>. Acesso dezembro 2016.
- [35] ABAL (Associação Brasileira do Alumínio), Fundamentos e aplicações do alumínio. Disponível em <www.abal.org.br/site/pdf/fundamentos-do-aluminio/001.pdf>. Acesso Dezembro 2016.
- [36] www.ebah.com.br/ ENSAIOS MECÂNICOS Escola de Engenharia Mecânica – UFRGS Professor Felipe Schaedler de Almeida