



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

DAYANE ANTUNES COIMBRA

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg OBTIDA A PARTIR DA
FUNDIÇÃO DE LACRES DE LATAS PARA ACONDICIONAMENTO DE BEBIDAS
E SOLIDIFICADA PELO MÉTODO DE FUNDIÇÃO “SQUEEZE CASTING”.**

MARABÁ-PA

2017

DAYANE ANTUNES COIMBRA

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg OBTIDA A PARTIR DA
FUNDIÇÃO DE LACRES DE LATAS PARA ACONDICIONAMENTO DE BEBIDAS
E SOLIDIFICADA PELO MÉTODO DE FUNDIÇÃO “SQUEEZE CASTING”.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Materiais como
requisito para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Materiais. Orientador: Prof. Esp.
Márcio Paulo de Araújo Mafra.

MARABÁ-PA

2017

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

Coimbra, Dayane Antunes.

Análise de resistência da liga Al-Mg obtida a partir da fundição de lacres de latas para acondicionamento de bebidas e solidificada pelo método de fundição squeeze casting.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2016.

1. Solidificação. 2. Liga (metalurgia). 3. Resistência de materiais. 4. Fundição. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orientador. II. Título.

CDD: 23. ed.: 620.17

DAYANE ANTUNES COIMBRA

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA LIGA Al-Mg OBTIDA A PARTIR DA FUNDIÇÃO DE LACRES DE LATAS PARA ACONDICIONAMENTO DE BEBIDAS E SOLIDIFICADA PELO MÉTODO DE FUNDIÇÃO “SQUEEZE CASTING”.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Bancada Examinadora:

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra – UNIFESSPA / FEMAT - Orientador

Prof. Dr. Elias Fagury Neto – UNIFESSPA / FEMAT - Membro Interno

Prof. Carlos Vinícius Paes dos Santos – IFPA/ Membro externo - Membro Externo

DEDICATÓRIA

A Deus vem 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, jamais mediram esforços para a realização desse sonho, me colocando sempre acima deles mesmos para que meus objetivos fossem alcançados por apoiarem sempre meus estudos, planos e escolhas. Por estarem sempre junto a mim quando necessitei mesmo a distancia, essa conquista é dedicada especialmente a vocês, meus principais pilares de sustentação.

Ao professor, Marcio Mafra que sempre somou conhecimento e apresentou desafios acreditando em meu potencial e pelo grande suporte sempre dado ao longo de minha graduação.

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço de modo especial à minha mãe Maria Osvaldina e meu pai Dagvaldo, 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.

Agradeço aos meus amigos da FEMAT 2012, Wilker, Hilbenária e Charles pela ajuda e contribuição no desenvolvimento desse trabalho, e em especial Pâmella Moreira, Maria Rita Almeida e Samara Alves, 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, e consolo nos momentos difíceis, pelos incontáveis momentos bons que vivemos juntas, e por terem sido uma verdadeira família para mim em todo esse longo trajeto.

Ao meu namorado Eduardo Araújo, pelo apoio incondicional, por toda ajuda compreensão, apoio e companheirismo durante o período de desenvolvimento do presente trabalho.

E por fim a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Meus sinceros agradecimentos a todos

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

A fundição por muitas vezes é considerada uma das mais antigas, se não, a mais versátil dentre os processos de fabricação de componentes metálicos, o squeeze casting dentro da fundição é um processo inovador. O processo squeeze casting é um processo de fundição, no qual o metal vazado no estado líquido, é solidificado sob pressão dentro de um molde metálico fechado por um punção. Em geral componentes fabricadas por squeeze casting possuem granulação fina, excelente acabamento de superfície e quase livre de porosidade, os mesmos podem ser de diferentes tamanhos e formatos, as propriedades mecânicas são aumentadas significativamente, em comparação ao método tradicional de fundição e, além disso, peças fabricadas por squeeze casting possuem soldabilidade superior e são aptas a tratamentos térmicos, e por fim em comparação com a fundição comum peças fabricadas por squeeze casting são formadas em uma só operação com um menor consumo de energia. Este aplicado ao Alumínio e ao Magnésio modifica consideravelmente a estrutura do metal quando comparado aos demais métodos. Neste trabalho foram fundidos, lacres de latinha e analisou-se as alterações estruturais e mecânicas a tração da liga Al-Mg obtida com a fundição do lacre solidificada sob pressão. Observou-se que a pressão exerceu influência na macroestrutura diminuindo a presença dos defeitos de fundição, na microestrutura final. Este processo contribuiu para a seleção de uma liga de Al-Mg com mínimos defeitos de fundição e melhores resultados de resistência a tração para as composições analisadas.

Palavras-chave: Liga Al-Mg; Squeeze Casting; Resistência à tração; Microestrutura.

ABSTRACT

For many times the foundry is considered one of the oldest, if not the most versatile of the manufacturing processes of metallic components, the squeeze casting inside the casting is an innovative process. The squeeze casting process is a casting process, in which the molten metal in the liquid state is solidified under pressure into a metal mold closed by a puncture. In general, components made by squeeze casting have fine granulation, excellent surface finish and almost porosity-free, they can be of different sizes e formats, the mechanical properties are increased significantly, compared to the traditional method of casting and, besides, parts manufactured by squeezing casting superior weld ability and are suitable for heat treatments, and finally compared with the common casting, manufactured parts by squeezing casting are formed in a single operation with a lower power consumption. This applied to Aluminum and Magnesium modifies considerably the structure of the metal when compared to other methods. In this work, the soda cans seals were fused and were analyzed the alterations structural and mechanical alterations the Al-Mg alloy traction obtained by casting the solidified seal under pressure. It was observed that the pressure exerted influence in the macrostructure reducing the presence of the defects of foundry, in the final microstructure. This process contributed to the selection of an Al-Mg alloy with minimum casting defects and better tensile strength results for the compositions analyzed.

Key-words: Al-Mg alloy, Squeeze Casting, Tensile strength, Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do processo squeeze casting: (a) fusão do metal, pré-aquecimento e lubrificação, (b) vazamento na coquilha, (c) solidificação do metal sob pressão, (d) ejeção da peça, limpeza da coquilha e recarga.	19
Figura 2: Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta	20
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.....	20
Figura 4: Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais.	23
Figura 5: Representação esquemática de um microscópio óptico.....	29
Figura 6: Esboço da curva obtida pelo ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional)	31
Figura 7: Corpos de provas	32
Figura 8: Representação esquemática do dispositivo usado para a condução de ensaios de tensão-deformação sob tração.	33
Figura 9: Ilustração d método de dureza Brinell (HB)	34
Figura 10: Ilustração de um ensaio de dureza Rockwell (HR).	35
Figura 11: Representação da forma correta das endentações.....	35
Figura 12: Fluxograma do procedimento experimental realizado.	37
Figura 13: (a) Cadinho de carbetto de silício, (b) Forno elétrico utilizado na fusão das ligas.	38
Figura 14: (a) Termopar acoplado a um plug-conector, (b) sistema de aquisição de dados... ..	39
Figura 15: (a) Lingoteira de aço 1045 e, (b) prensa hidráulica semiautomática, (c) lingoteira acoplada à prensa.....	40
Figura 16: (a) Máquina universal de ensaios mecânicos; (b) Durômetro de bancada.	41
Figura 17: (a) Material a ser fundido, (b) Entrada do material no forno para início da fundição, (c) primeira retirada para remoção de escória e adição de mais material.....	42
Figura 18: (a) material fundido em resfriamento até atingir a temperatura de vazamento, (b) encaixe da lingoteira pré-aquecida à máquina.	43
Figura 19: (a) Vazamento do material, (b) Aplicação de pressão, (c) Lingote solidificado. ..	43
Figura 20: Representação esquemática do método de lixamento de trabalho em sentidos alternados.....	44
Figura 21: amostra logo pronta para realização de ensaio do ensaio de dureza.....	45
Figura 22: esquematização da produção dos corpos de prova a partir da usinagem dos lingotes.	46

Figura 23: Lingote após dois cortes longitudinais	46
Figura 24: Corpos de prova cortados e prontos para serem usinados	47
Figura 25: Dimensões proporcionais recomendadas. Em destaque, no quadrado, o utilizado no procedimento deste trabalho.	47
Figura 26: Corpos de prova de ensaio de tração	48
Figura 27: (a) corpo de prova posicionado na máquina de ensaios, (b) Visão aproximada da garra que acopla o corpo de prova.	48
Figura 28: Macroestrutura analisada da liga Al-Mg	49
Figura 29: secção ampliada da macroestrutura do lingote cortado	50
Figura 30: Microestrutura da Liga Al-Mg, (a)50 X, (b) 100X, (c) 200X, (d) 500X,.....	51
Figura 31: Microestrutura da Liga Al-Mg, (a)500X, (b) 1000X.....	52
Figura 32: Espectrômetro das microsegregações.	53
Figura 33: Composição das microsegregações.	53
Figura 34: Representação de um corpo de prova ensaiado.	55
Figura 35: Gráfico da tensão versus o do deslocamento para cada corpo de prova ensaiado da à liga Al-Mg.	56
Figura 36: Desvio padrão pra mais, curva característica e desvio padrão pra menos.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores experimentais de A para alguns materiais.....	36
Tabela 2: Representação dos valores percentuais dos elementos, média e desvio padrão.	54
Tabela 3: Dureza média e desvio padrão da amostra solidificada.....	54
Tabela 4: Valores de deslocamento	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	O PROCESSO SQUEEZE CASTING	18
3.1.1	Parâmetros do processo	21
3.1.2	Algumas vantagens do processo squeeze casting	22
3.1.3	Macroestrutura	23
3.1.4	Microestrutura	24
3.1.5	Capacidade de produção.....	24
3.1.6	Defeitos e métodos de prevenção	25
3.2	ALUMÍNIO E SUAS APLICAÇÕES	27
3.2.1	Lacres de alumínio.....	27
3.2.2	Liga Al-Mg (Série 5XXX)	28
3.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA	28
3.3.1	Microscopia óptica.....	29
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	30
3.4.1	Ensaio de tração.....	30
3.4.2	Ensaio de dureza	33
3.5	CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRACÃO CONVENCIONAL	35
4	METODOLOGIA	37
4.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	37
4.1.1	Materiais.....	38
5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42

5.1	FORMA DE FUNDIÇÃO DOS LINGOTES	42
5.2	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA	44
5.3	MEV E EDS	44
5.4	DUREZA	45
5.5	ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
6.1	ANÁLISE MACROESTRUTURAL	49
6.1.1	Análise da liga Al-Mg	49
6.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	50
6.3	ANÁLISE QUÍMICA	52
6.4	ANÁLISE DE DUREZA	54
6.5	LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (LRT).....	55
6.5.1	Resultado da correlação entre a dureza brinell e o limite de resistência a tração convencional.....	58
7	CONCLUSÕES	59
7.1	ANÁLISE MACROESTRUTURAL	59
7.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	59
7.3	ANÁLISE DO LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E DUREZA	59
7.4	CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO.....	60
	REFERÊNCIAS.....	62

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 tem 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, o processo *squeeze casting* 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, analisou-se o limite de resistência à tração da liga de Alumínio obtida a partir da fundição de lacres de latinhas de alumínio utilizadas para acondicionar bebidas, e solidificadas pelo processo squeeze casting.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho teve por objetivo fundamental, a avaliação da resistência à tração de uma liga e alumínio que foi obtida por fundição de lacres de latas de bebidas e solidificada através do processo squeeze casting.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a macroestrutura da liga obtida a partir dos lacres de latinha e solidificada pelo processo “Squeeze casting”, e comparar os resultados com os já existentes na literatura.
- 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-Mg e estimar o limite e resistência à tração a partir dos seus resultados de dureza Brinell.

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. [6].

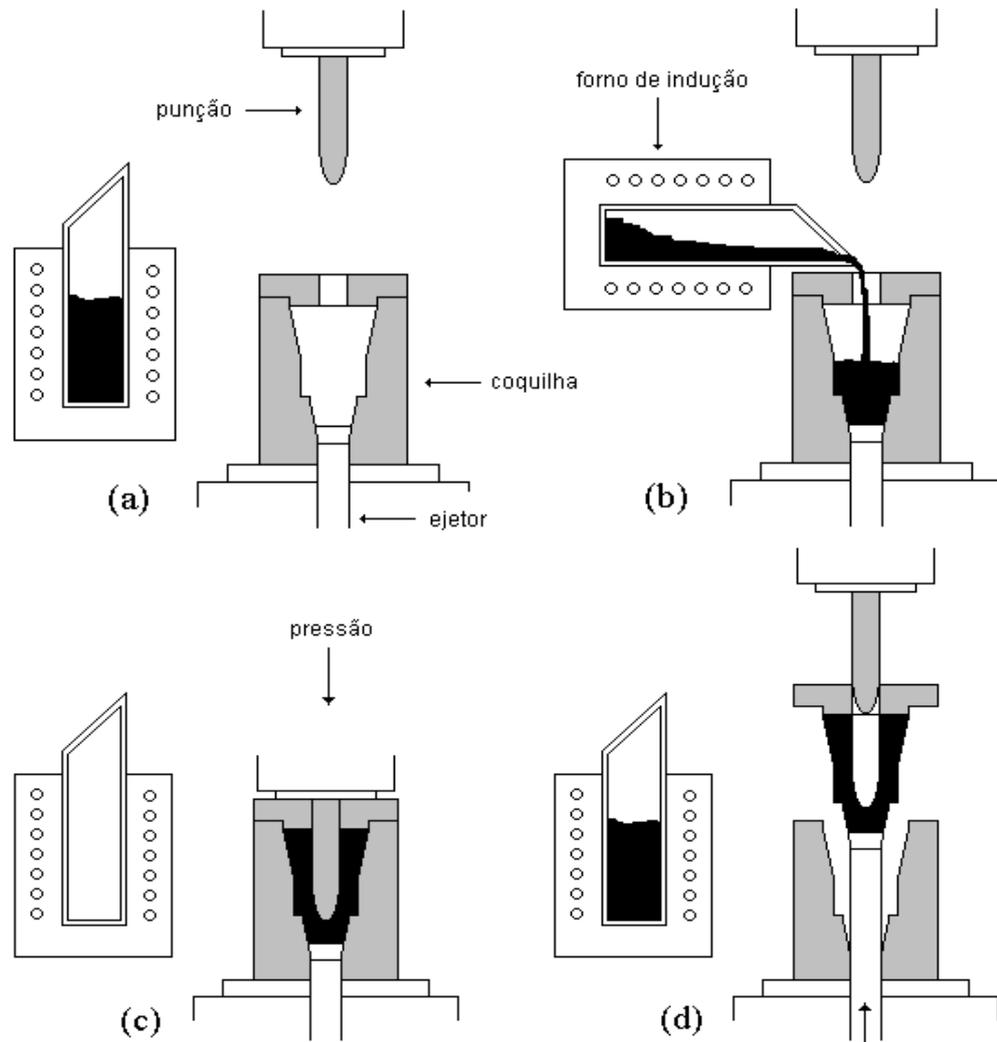
Literalmente fundição por aperto (compressão), também conhecido como forjamento do metal líquido, fundição por extrusão ou cristalização sob pressão [3].

O *squeeze casting* consiste, basicamente, na solidificação do metal em um molde metálico sob a aplicação de altas pressões. A técnica é econômica e relativamente simples, possuindo grande potencial para automatização e altas taxas de produção.

No processo *squeeze casting* o metal, após fusão e vazamento, solidifica sob pressão dentro de um molde permanente posicionado entre as placas de uma prensa hidráulica. O processo é mostrado esquematicamente na figura 1 e pode ser dividido em quatro etapas [3]:

- a) 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.
- b) 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;
- c) A pressão é aplicada sob o metal fundido e é mantida até que todo o metal esteja solidificado;
- d) O punção retorna para sua posição original e a peça fundida é ejetada.

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



Fonte: [3]

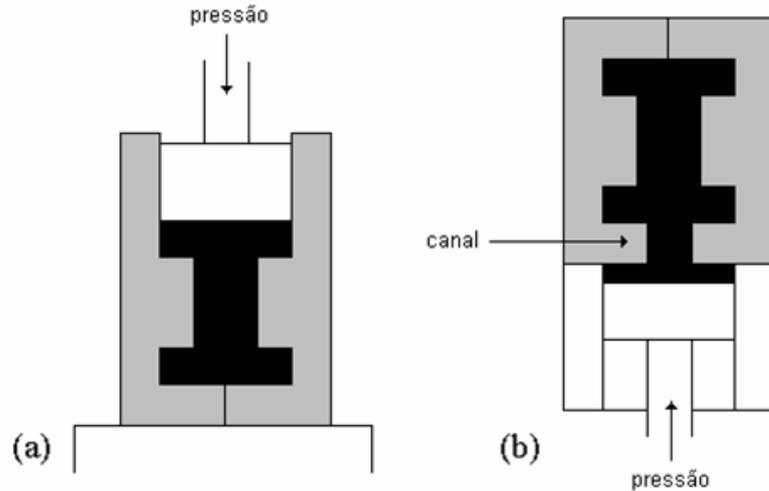
Em geral, existem dois tipos de *squeeze casting*: prensagem direta e indireta [3].

A técnica de prensagem direta é caracterizada pela imposição da pressão diretamente sobre a superfície total da peça, como mostrado na figura 2(a). Com esta técnica se obtém máxima densidade e a transferência de calor é extremamente rápida resultando em um material de granulação fina e com excelentes propriedades mecânicas [4].

A técnica de pressão indireta é mostrada na figura 2.b. Neste caso o metal líquido é vazado em um recipiente ligado à coquilha por um canal; o metal é pressionado preenchendo assim a coquilha. Com a coquilha cheia a pressão é exercida apenas sobre o metal que ainda está no recipiente sendo transmitida para a peça indiretamente pelo canal. Com esta técnica é difícil manter a peça sobre alta pressão durante todo o tempo de solidificação, ou seja, é difícil

trabalhar com ligas possuindo grande intervalo de solidificação. Embora a técnica direta seja muito melhor que a indireta do ponto de vista da qualidade da peça, a técnica indireta é muito mais utilizada industrialmente porque, neste caso, um sistema de vazamento preciso não é necessário em contraste com a técnica direta onde se deve vaziar a exata quantidade de metal da peça o que é, sem dúvida, difícil de controlar [6].

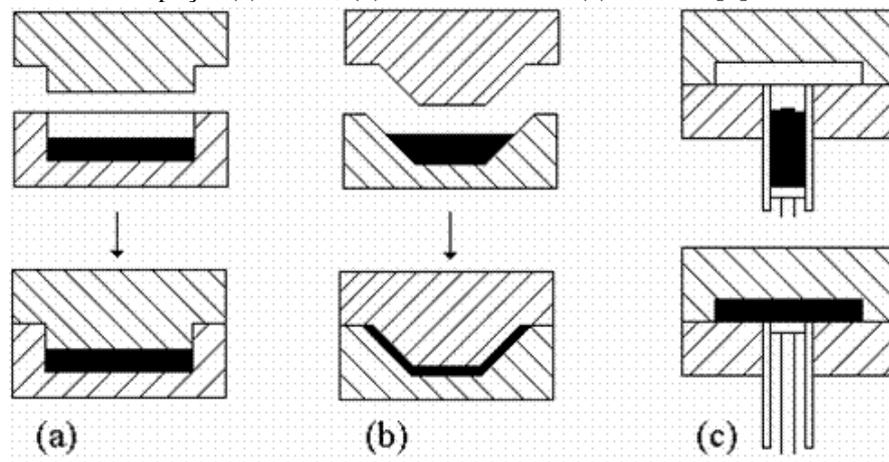
Figura 2: Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta



Fonte: [3]

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



Fonte: [3]

O processo *squeeze casting* tenta combinar as vantagens das tecnologias de fundição e forjamento: a pressão aplicada e o contato instantâneo do metal líquido com a superfície do

molde gera uma condição de rápida transferência de calor e produz uma peça livre de poros e de granulação fina; esta peça tem propriedades mecânicas próximas daquelas de um produto forjado combinadas com as formas e baixo custo das peças fundidas [4; 6].

A elevada pressão aplicada, em torno de 70 MPa, é suficiente para evitar a formação de porosidade; além disso, a tendência à formação de poros é limitada pelo uso de um superaquecimento mínimo, este último é possível porque na fundição sob pressão a fluidez do metal líquido, que requer altas temperaturas de vazamento, não é necessária para o preenchimento da coquilha o qual é obtido pela aplicação da pressão. Nas seções mais espessas da peça, onde existe maior probabilidade de aparecimento de porosidade, a pressão faz com que o metal líquido que se encontra nos pontos mais quentes seja deslocado para preencher os poros que estão se formando, impedindo com isso seu desenvolvimento. Este mecanismo é bastante satisfatório em ligas com grande intervalo de solidificação, obtendo-se peças muito homogêneas sem a necessidade de pressões muito altas acima de 100 Mpa [4; 6].

3.1.1 Parâmetros do processo

Muitas são as variáveis que devem ser controladas para que haja garantia de qualidade nas peças fundidas através de *squeeze casting*. Estes parâmetros variam, em geral, com o tipo de liga utilizada e com a geometria da peça, são os seguintes [6; 4].

- *Volume de metal fundido*-parâmetro que é 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.
- *Superaquecimento* – 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 10 e 100°C para ligas de alumínio [3]. 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.
- *Tempo de espera para pressurização* – é a duração entre o exato momento do vazamento e o instante em que a pressão é aplicada sobre o metal através do punção

(ou pistão). O tempo de espera varia bastante dependendo da temperatura de vazamento, complexidade da peça e do material, para grandes e simples peças de alumínio aproximadamente 1 minuto.

- *Lubrificação* – para a maioria das ligas não ferrosas a desmoldagem é facilitada aplicando-se sobre a superfície quente da coquilha um lubrificante de grafite coloidal na forma de spray. Cuidados devem ser tomados para não haver aplicação excessiva em zonas como as de ventilação ou mesmo a fim de prevenir uma eventual contaminação da superfície da peça.
- *Tempo de duração da aplicação da pressão* – a pressão pode ser retirada após a completa solidificação da peça e obtenção de uma homogeneização da temperatura.
- *Pressão aplicada* – a pressão é 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. Estas modificações afetam a microestrutura e as propriedades mecânicas do material.

As altas taxas de transferência de calor no processo *squeeze casting* obviamente diminuem o tempo de solidificação; para alumínio este tempo é reduzido pela metade [3]. Dependendo da geometria e das propriedades mecânicas requeridas, a pressão aplicada varia de 50 a 140 MPa sendo 70 MPa o valor geralmente utilizado [4].

Um parâmetro que também deve ser considerado é a própria liga. A composição e características físico-químicas da liga, como ponto de fusão, condutividade térmica, coeficiente de transferência de calor e soldabilidade, são parâmetros importantes devido aos efeitos diretos sobre a vida da lingoteira (coquilha) [7].

3.1.2 Algumas vantagens do processo *squeeze casting*

No *squeeze casting* a taxa de transferência de calor que é obtida, chega a ser 20 vezes a taxa de transferência que é encontrada em fundição por gravidade. Isso vem a ocorrer por conta da pressão que é aplicada, não vai haver “descolamento” da camada de metal que é solidificado na parede do molde o qual é uma consequência normal da contração do metal após solidificação. Em processos convencionais esse descolamento permite que seja formado um filme de ar entre o molde e o metal isso oferece uma grande resistência à transferência de calor [3].

A estrutura fina e propriedades mecânicas superiores dos componentes fabricados por *squeeze casting* se dão devido aos seguintes fatores:

- i. Mudanças no resfriamento da liga;
- ii. Mudanças na composição e porcentagens das fases na liga solidificada;
- iii. Mudanças no coeficiente de transferência de calor do molde e a liga;
- iv. Mudanças na densidade da liga devido à diminuição de porosidade.

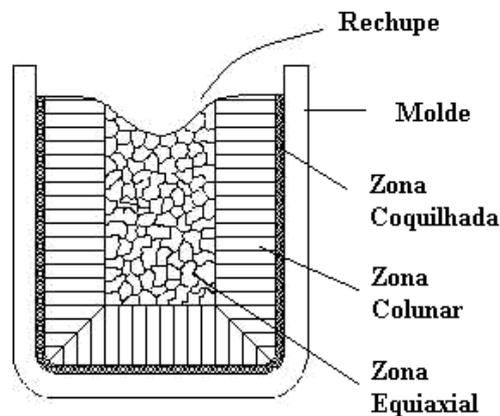
Geralmente as dendritas e o espaçamento interdendrítico de peças fundidas sob compressão são menores que aqueles de peças fundidas na ausência de pressão [4,12].

3.1.3 Macroestrutura

Em geral, a macroestrutura de solidificação pode apresentar três zonas distintas, conforme ilustrado na Figura 4:

- 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 [9].

Figura 4: Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais.



Fonte: [10]

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 [7].

3.1.4 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 [6].

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 [10]. 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, debaixo do ponto de atuação do punção, onde o grão é ainda mais refinado. Esta estrutura super-refinada pode atingir espessuras de até 2 mm Na prática podem ser produzidas peças com tolerância dimensional de $\pm 0,75$ mm de maneira que, mesmo após acabamento, ainda permanecerá uma camada super-refinada na superfície de pelo menos 0,5 mm

3.1.5 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 [8].

Para o processo Squeeze Casting destaca-se:

- *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% [6].

3.1.6 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, 6]:

- *Porosidade* – na fundição sob pressão, tanto direta quanto indireta, gases retidos no metal fundido representam um problema muito menos crítico do que em outros processos de fundição. Isto se deve a própria natureza do processo onde a pressão aplicada é usualmente suficiente para conter a formação de poros mantendo as moléculas de gás em solução. Portanto, porosidade pode ocorrer quando a pressão aplicada é insuficiente.

- *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.
- *Segregação por extrusão* – a microsegregação 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.
- *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.
- *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.

3.2 ALUMÍNIO E SUAS APLICAÇÕES

O alumínio 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 [13].

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 [14]. O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. Mesmo utilizado milênios antes de Cristo, 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 [15].

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.

Segundo ABAL, 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. Para o setor de alimentos, traz funcionalidade e praticidade às embalagens por seu peso reduzido em relação a outros materiais.

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. [15].

3.2.1 Lacres de alumínio

As latas para bebidas carbonatadas, cervejas e refrigerantes, produzidas atualmente em alumínio ou aço estanhado, são em sua grande maioria latas de duas peças. Nas latas de aço ou de alumínio as tampas são sempre de alumínio devido ao sistema de

abertura com semicorte, que se presta apenas para este metal, face ao risco de oxidação do aço [16].

Os lacres das latas de alumínio são circundados pelo mito de que possuem um grande valor de venda, bem maior que o da lata em si, porém não passa de uma “lenda urbana”. A verdade é que como a liga do qual é feito o anel contém alto teor de magnésio e este tem a maior potencial de oxidação que o alumínio, se ele (o anel) não estiver junto com a lata, fica mais fácil sua oxidação no forno [17].

3.2.2 Liga Al-Mg (Série 5XXX)

As ligas da série 5xxx, as ligas de Al-Mg, constituem um importante grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, ou seja, não são endurecíveis por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, mas sim por solução sólida e encruamento (trabalho mecânico). O magnésio como principal elemento de liga, além de melhorar a resistência mecânica, permite que essas ligas mantenham uma elevada ductilidade, bem como excelente resistência à corrosão e boa soldabilidade. Tais características fizeram com que elas estejam entre as ligas preferidas para algumas aplicações nas indústrias metal-mecânica e naval [18]

São utilizadas em aplicações nas quais se exige razoável resistência mecânica com excelente resistência à corrosão. As ligas 5042, 5352, 5082 e 5182 são usadas na fabricação de tampas para latas de bebidas, mais frequentemente as ligas 5082 e 5182 [16]. As ligas Al-Mg também se destacam por uma ampla faixa de resistência e capacidade de apresentar excelente qualidade de acabamento superficial, como brilho intenso e baixa rugosidade. Essa combinação favorável amplia significativamente o uso dessas ligas, que com baixos teores de ferro e tratamentos adequados podem ser usadas na fabricação de acessórios para automóveis, componentes arquitetônicos e outras aplicações decorativas [18].

3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Existem dois tipos de análise metalográfica, a análise macro e a micrográfica, sendo que a primeira é uma análise a olho nu, e a segunda é uma análise com a utilização do microscópio, neste trabalho iremos abordar a análise micrográfica [19].

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 [20].

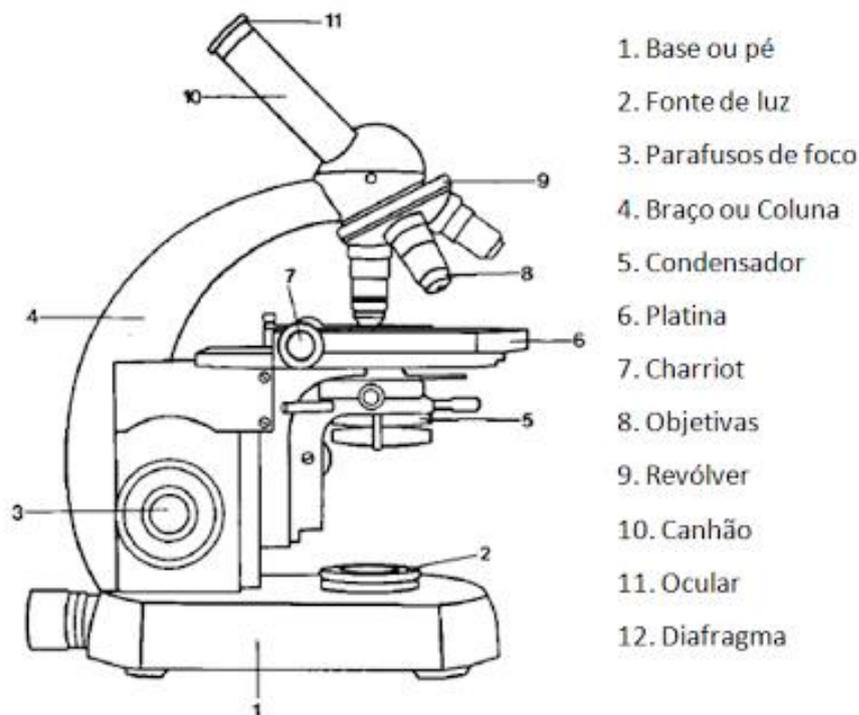
3.3.1 Microscopia óptica

Na microscopia óptica, o microscópio óptico é utilizado para estudar a microestrutura, sistemas ópticos e de iluminação são os seus elementos básicos. Para materiais que são opacos à luz visível (todos os metais), apenas a superfície do material é submetida à observação e o microscópio óptico deve ser usado no modo de reflexão.

Os contrastes na imagem produzida resultam das diferenças na refletividade das várias regiões da microestrutura. As investigações desse tipo são chamadas frequentemente de metalográfica, uma vez que os metais foram os primeiros materiais a ser examinados com o emprego dessa técnica [19].

A figura 5 mostra a representação esquemática de um microscópio óptico.

Figura 5: Representação esquemática de um microscópio óptico.



Fonte: [20]

3.4 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 [22].

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, entre outras [21, 23].

3.4.1 Ensaio de tração

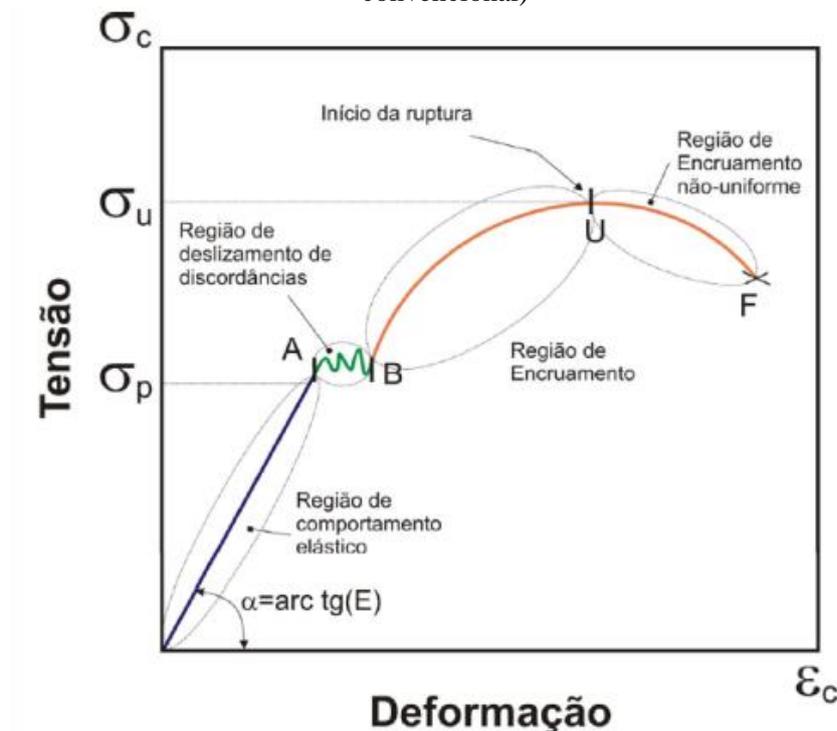
Em um ensaio de tração, um corpo de prova é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à ruptura [21]. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este é fixado numa máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes, a máquina de tração pode ser vista na figura 9. Os esforços ou cargas são mensurados na própria máquina, e, normalmente, o ensaio ocorre até a ruptura do material.

Com esse tipo de ensaio, pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio [26]. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições para a variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa variação, extremamente útil para o engenheiro, é determinada pelo traçado da curva tensão-deformação a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos.

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 [27].

Em um ensaio de tração, obtém-se o gráfico tensão-deformação, que pode ser visto na figura 6, na qual é possível analisar o comportamento do material ao longo do ensaio. Do início do ensaio, até a ruptura, os materiais geralmente passam pelas deformações elásticas e plásticas.

Figura 6: Esboço da curva obtida pelo ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional)

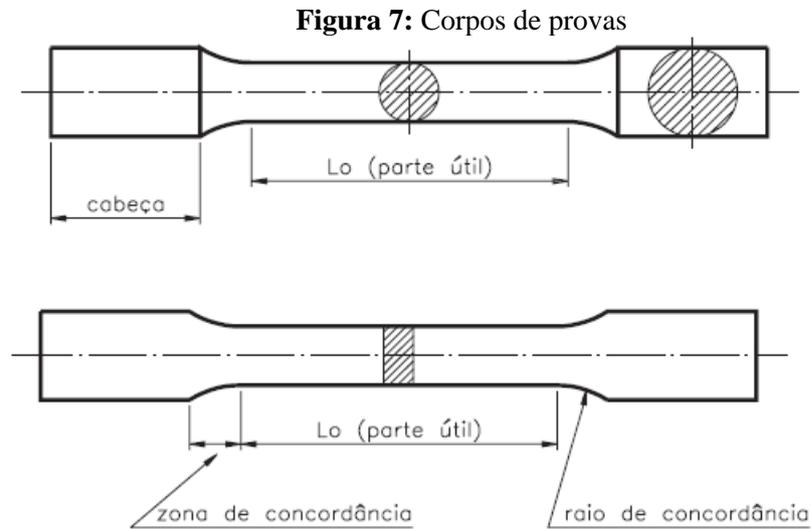


Fonte: [26]

3.4.1.1 Corpo 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 [21].

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



Fonte: [27]

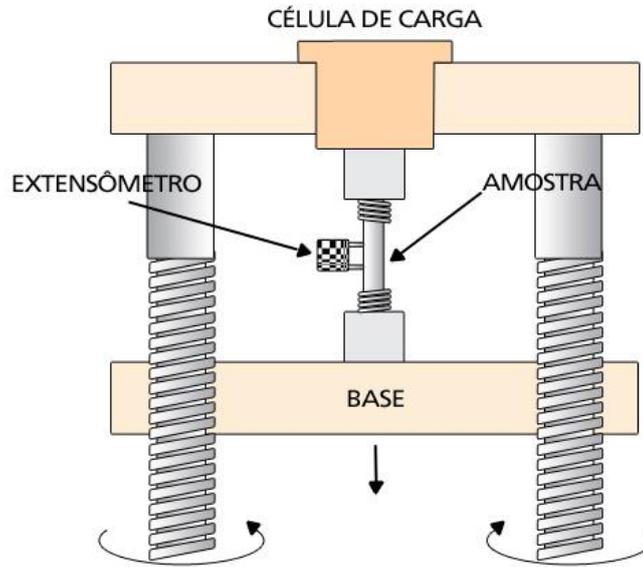
O resultado de um ensaio de tração deste tipo é registrado em um registrador gráfico ou por um computador, na forma de carga ou força em função do alongamento [21].

3.4.1.2 Equipamento

Segundo CALLISTER 2008. 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.

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 [28].

Figura 8: Representação esquemática do dispositivo usado para a condução de ensaios de tensão-deformação sob tração.



Fonte: [21]

3.4.2 Ensaio de dureza

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos mais aplicados em engenharia se utilizam de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga e carga [22, 23].

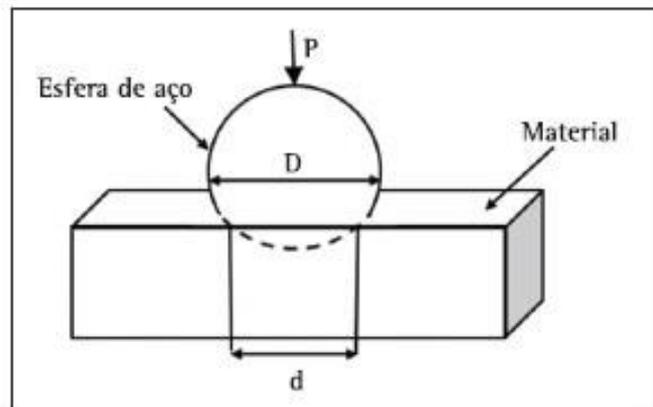
A dureza é uma medida da resistência de um material à deformação plástica local (por exemplo, um pequeno endentamento ou um risco). Os primeiros testes de dureza eram baseados em minerais naturais com uma escala construída somente com base na capacidade de um material riscar um outro que é mais macio [21]. 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 [24].

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 [21].

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 [23. 24].

Figura 9: Ilustração d método de dureza Brinell (HB)



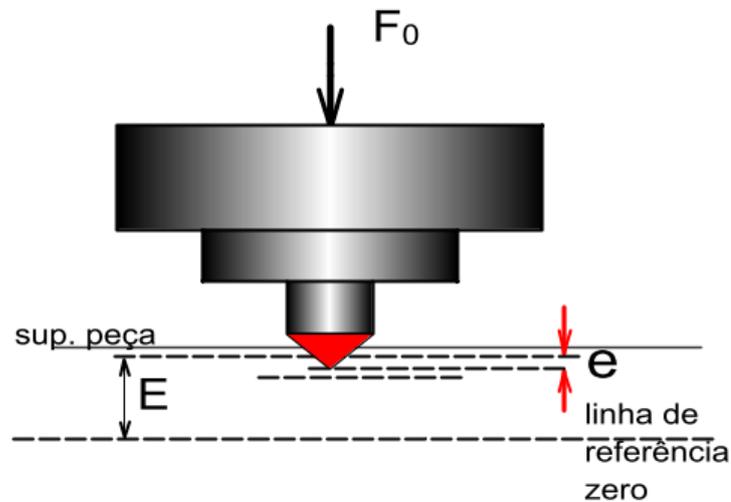
Fonte: [29]

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 [24].

Os testes Rockwell constituem o método mais comum usado para medir dureza porque eles são simples para realizar e não requerem nenhuma habilidade especial [21].

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 [22]. A Figura 10 mostra como se determina a dureza Rockwell.

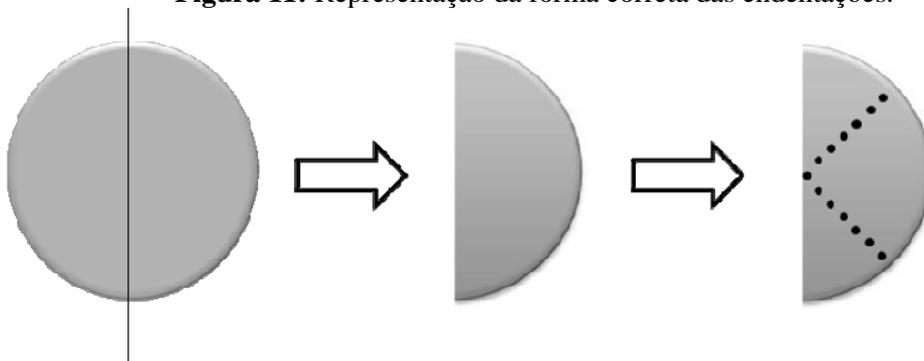
Figura 10: Ilustração de um ensaio de dureza Rockwell (HR).



Fonte: [30]

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 [30].

Figura 11: Representação da forma correta das endentações.



Fonte: Autor

3.5 CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRACÃO 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 (GARCIA, 2000):

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

Em que

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

α = constante experimental.

A Tabela 1 apresenta os valores da constante experimental (A) 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 [9]

Tabela 1 – 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

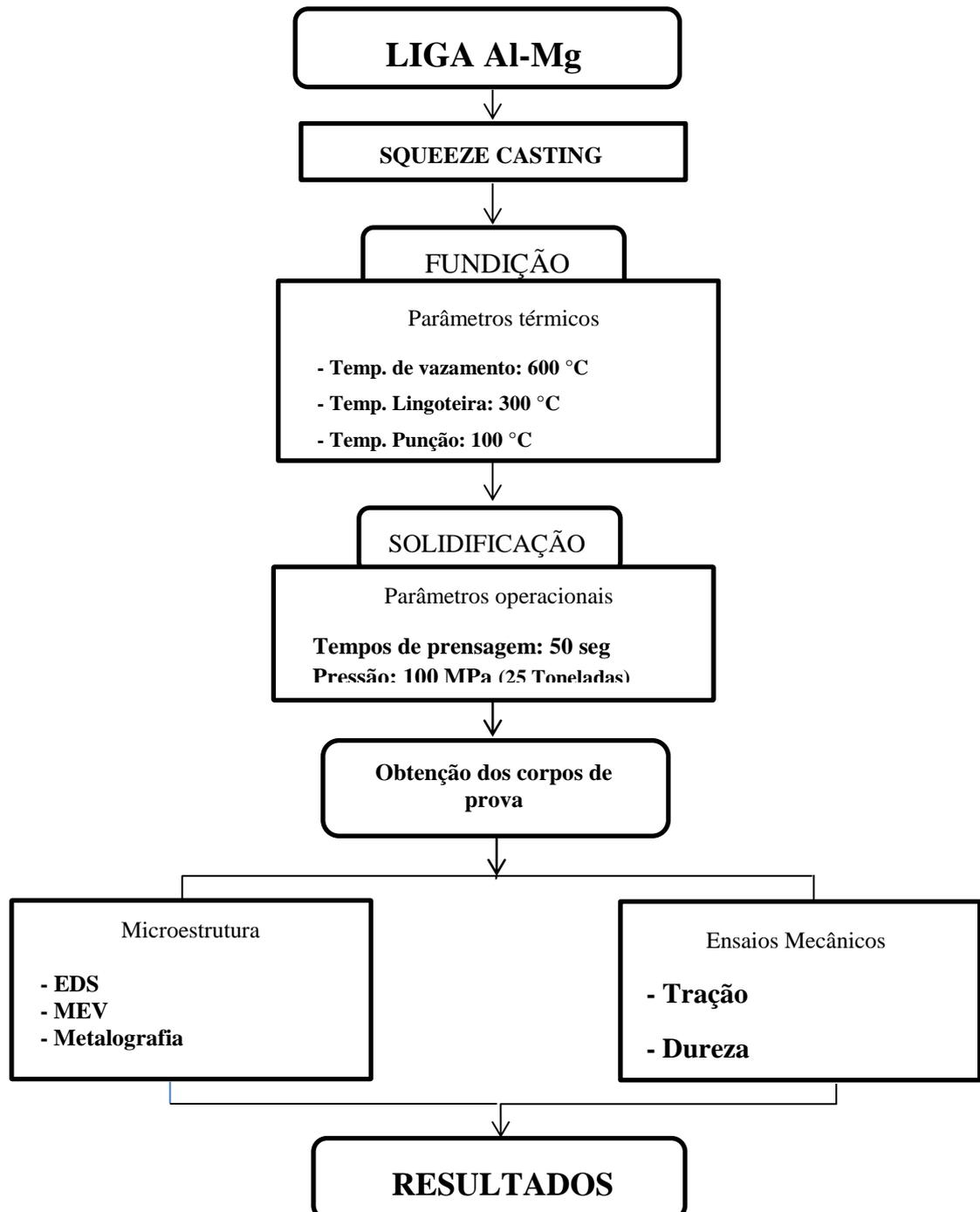
Fonte: [24]

4 METODOLOGIA

4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para a realização experimental do presente trabalho, adotou-se um planejamento conforme o fluxograma mostrado na Figura 12.

Figura 12: Fluxograma do procedimento experimental realizado.



Fonte: Autor

4.1.1 MATERIAIS

A seguir estão relacionados os equipamentos envolvidos na execução experimental.

I. Acessórios e equipamentos para obtenção das ligas e lingotes, figura 13.

- **Cadinho de carbetto de Silício** modelo AS 6 da Carbosil, revestido internamente com alumina em solução, para evitar contaminação do banho de metal líquido.
- **Forno tipo mufla**, marca Elektro Jong, , com interior revestido de placas refratárias e controle processado de temperatura.

Figura 13: (a) Cadinho de carbetto de silício, (b) Forno elétrico utilizado na fusão das ligas.



(a)



(b)

Fonte: Autor

II. Acessórios e equipamentos para controle das temperaturas, figura 14.

- **Termopares:** termopares de diâmetro ($=1,5$ mm) do tipo K para temperaturas de até 1200°C .
- **Sistemas 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.

Figura 14: (a) Termopar acoplado a um plug-conector, (b) sistema de aquisição de dados.



(a)



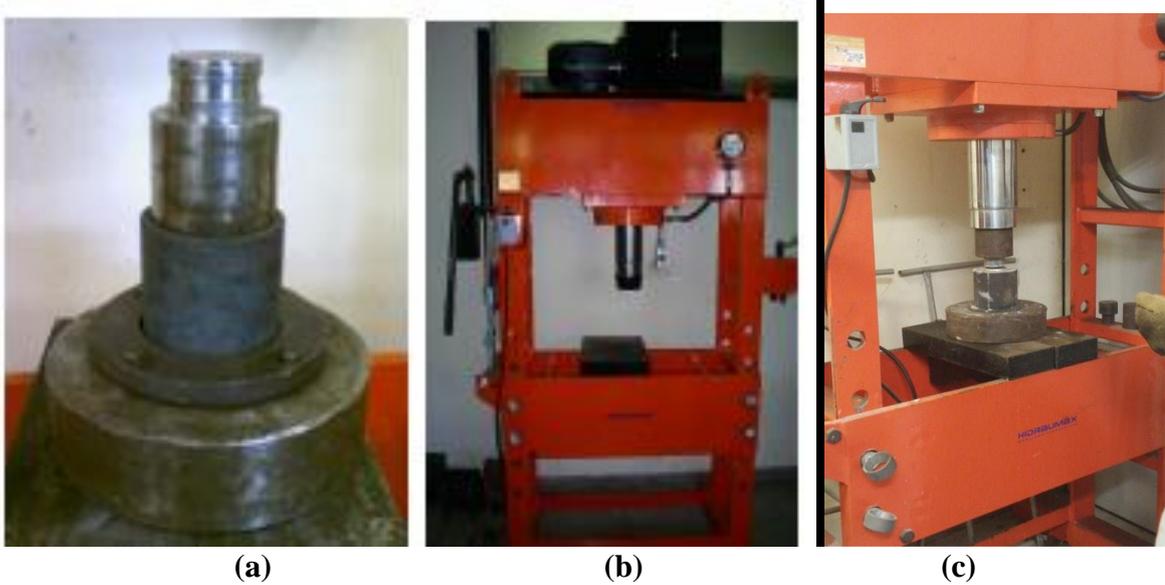
(b)

Fonte: Autor

III. 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 Figura 15 (a).
- **Prensa hidráulica** com capacidade de 100 toneladas semiautomático da marca HIDRAUMAX. Figura 15 (b).
- **Lixadeira politriz AROTEC** mostrada na figura 15 (c), modelo AROPOL 2V com duas velocidades fixas, 300 e 600 rpm.

Figura 15: (a) Lingoteira de aço 1045 e, (b) prensa hidráulica semiautomática, (c) lingoteira acoplada à prensa.



Fonte: Autor

IV. Equipamentos para análises experimentais, figura 16.

- **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 de bancada** marca PANTEC
- **Máquina Universal de Ensaio Mecânico** da marca Kratos utilizada para realização dos ensaios de tração.
- **MEV (microscópio eletrônico de varredura)** da marca HITACHI, modelo TM 3000.
- **EDS** da marca TOSHIBA, modelo SwiftED 3000.

Figura 16: (a) Máquina universal de ensaios mecânicos; (b) Durômetro de bancada; (c) MEV; (d) Microscópio ótico.



(a)



(b)



(c)



(d)

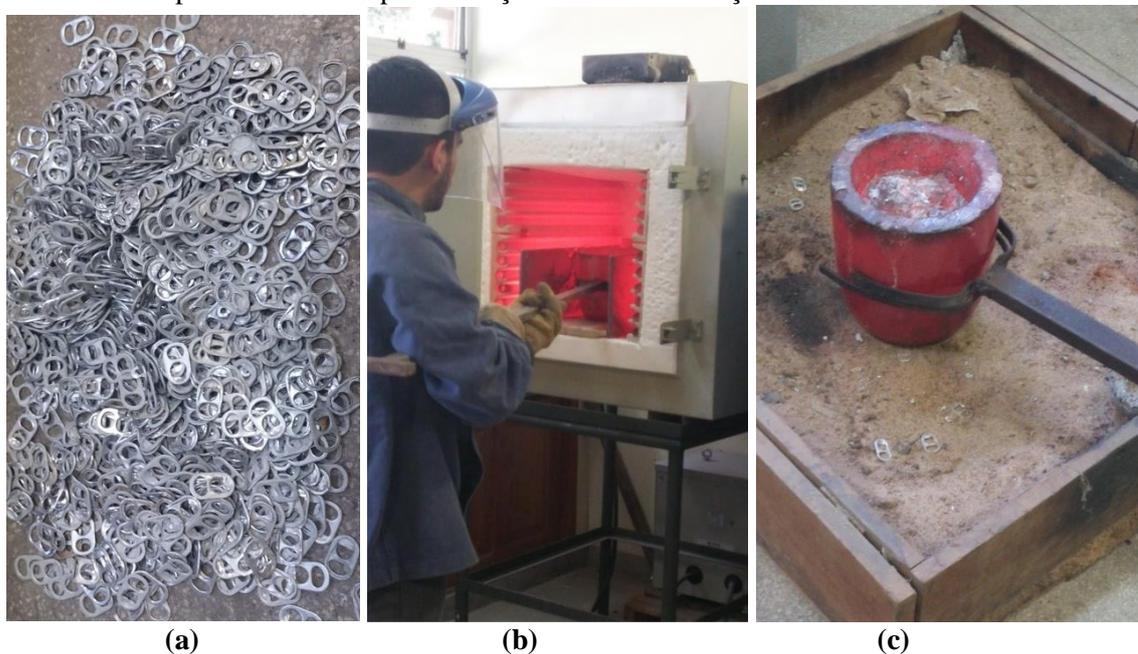
Fonte: Autor

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 FORMA DE FUNDIÇÃO DOS LINGOTES

O experimento consistiu na obtenção da liga fundindo-se o alumínio com uso de um cadinho a um superaquecimento de 800°C a 900°C para fornecer energia suficiente para a difusão do alumínio que foi fundido e homogeneizado; posteriormente a liga foi refundida.

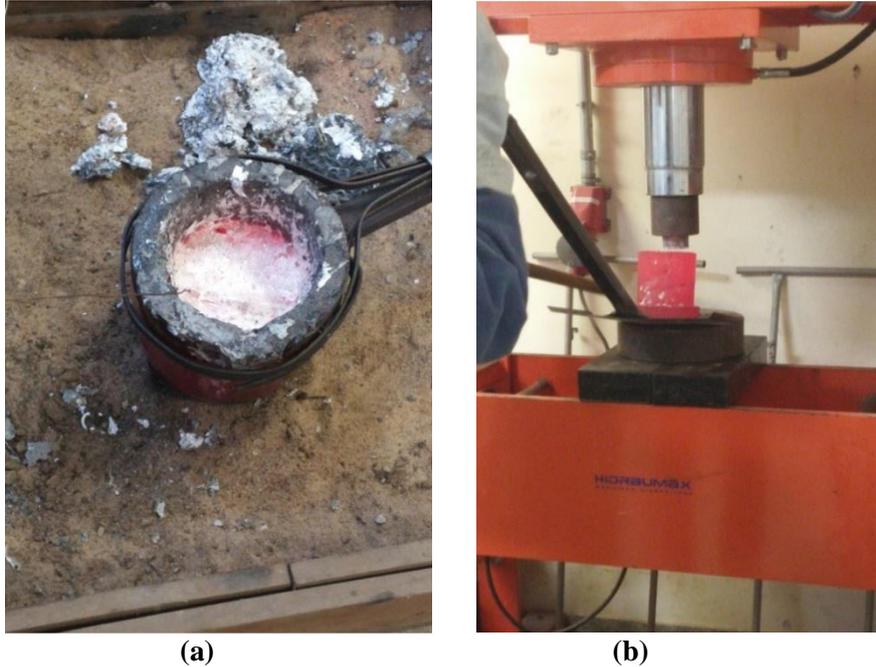
Figura 17: (a) Material a ser fundido, (b) Entrada do material no forno para início da fundição, (c) primeira retirada para remoção de escória e adição de mais material.



Fonte: Autor

A lingoteira foi pré-aquecida a uma temperatura de 300°C, o metal líquido foi vazado na lingoteira a 600°C sob a prensa onde foi executada a pressurização; 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 50 segundos.

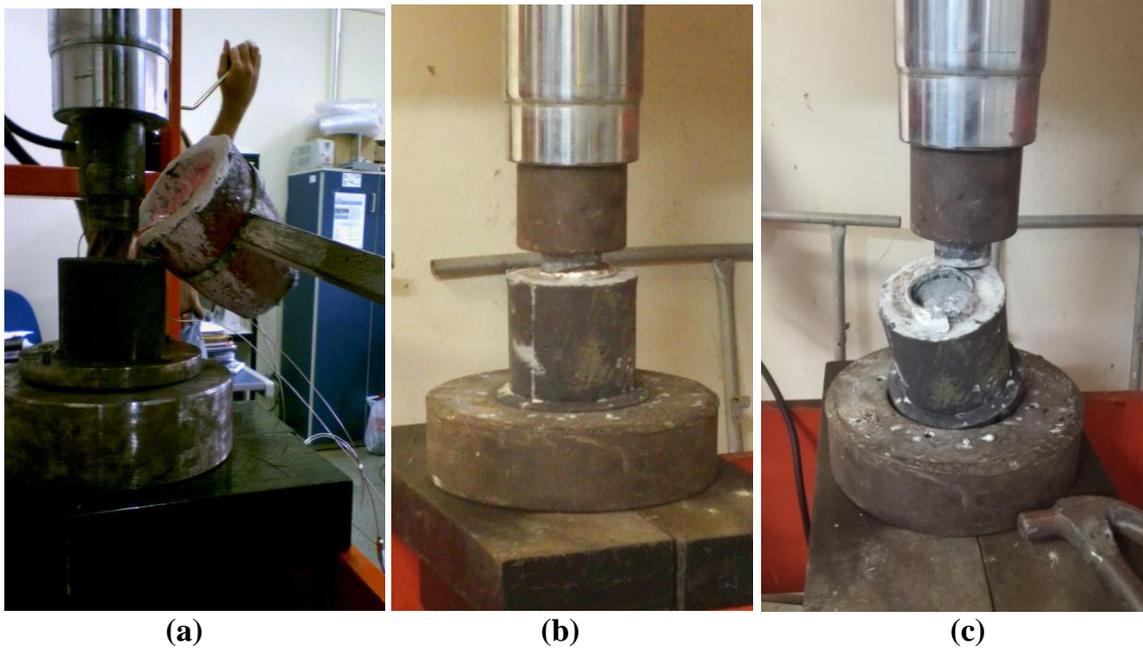
Figura 18: (a) material fundido em resfriamento até atingir a temperatura de vazamento, (b) encaixe da lingoteira pré-aquecida à máquina.



Fonte: Autor

Para exercer a pressão necessária ao processo utilizou-se uma prensa hidráulica, aplicando-se aos lingotes uma pressão de 25 toneladas (100 MPa), para (Garcia, 2001) pressão ótima, não apresentando alterações na morfologia da liga.

Figura 19: (a) Vazamento do material, (b) Aplicação de pressão, (c) Lingote solidificado.

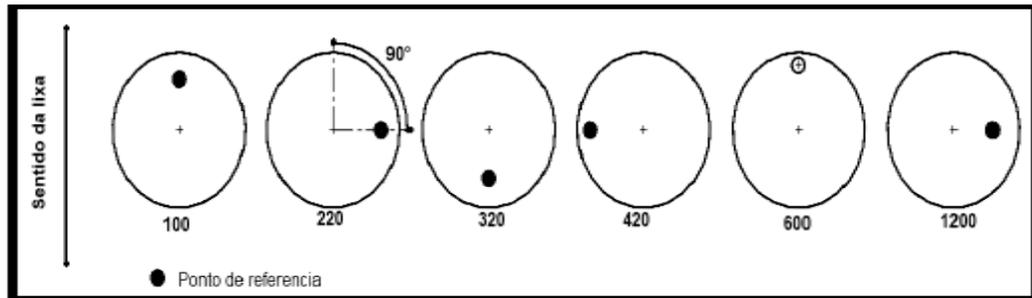


Fonte: Autor

5.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA

A partir do lingote solidificado, preparou-se a caracterização macro e microestrutural dos corpos de prova. Para a preparação da superfície correto lixamento.

Figura 20: Representação esquemática do método de lixamento de trabalho em sentidos alternados.



Fonte: [19]

São descritas na sequência as técnicas metalográficas apropriadas:

- Os lingotes solidificados foram seccionados em um plano médio, para a preparação da estrutura para análise microscópica e ensaio de dureza, utilizou-se um jogo de lixas d'água de granulometria 80, 100, 180, 220, 360, 500, 600, 1200, 1500 mesh as quais foram utilizadas na lixadeira politriz.
- A próxima etapa foi a de polimento, a operação de polimento (pós lixamento) visa um acabamento superficial polido isento de marcas, com isso, utiliza-se para este fim um abrasivo como a pasta de diamante ou alumina [11]. As amostras foram polidas com alumina 9, 6, 3 1 μm respectivamente até que adquirisse uma superfície espelhada.
- Posterior ao polimento tem-se o ataque químico, a peça foi atacada com Villela 5% (5 ml HNO_3 + 95 ml Álcool Etílico) por imersão durante 1 minuto, tempo que foi necessário para notar macroscopicamente uma mudança na superfície da peça.
- Após o ataque químico, a amostra foi analisada ao microscópio óptico, onde foram captadas as imagens para posterior estudo mais preciso do material. A amostra foi observada no microscópio.

5.3 EDS

Utilizou-se o EDS para identificação dos componentes presentes no material estudado, ou seja, para uma análise química deste.

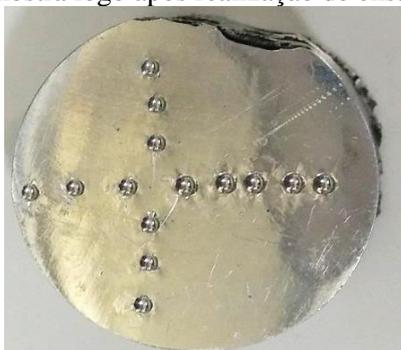
foi feita uma determinada amostra que permite determinar quais são os elementos químicos e quanto há de cada elemento no material em estudo. O método requer que ao menos um pico característico para cada fase seja bem isolado, e que o número de amostras de calibração seja igual ou exceda o número de fases envolvidas.

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.

5.4 DUREZA

Para a aferição da dureza na amostra foi realizado lixamento (amostra foram lixada até a lixa de 600 mesh) e limpeza ao longo da espessura, logo após foi realizado o ensaio de dureza em pontos distintos na peça para coleta e elaboração da média estatística. A Figura 21 mostra a peça logo após a realização do ensaio de dureza.

Figura 21: amostra logo após realização de ensaio do ensaio de dureza



Fonte: Autor

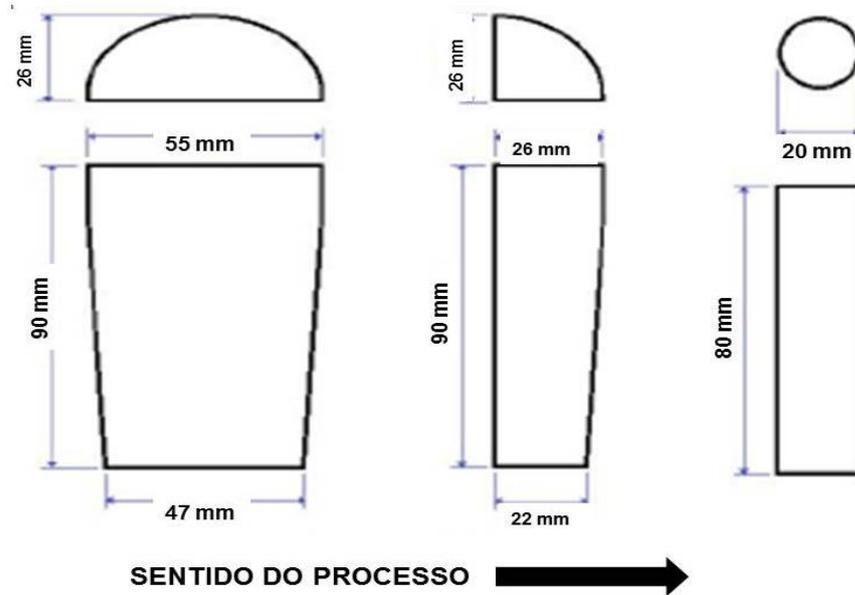
As medições foram feitas com o durômetro de bancada PANTEC, as medias foram realizadas na escala Rockwell F e convertidas posteriormente para escala Brinell.

5.5 ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para a medição do limite de resistência à tração foram produzidos os corpos de prova usando a metade dos lingotes, nos quais não foi feito o tratamento metalográfico, para cada metade foi feito um corpo de prova. A metade do lingote foi serrada ao meio

longitudinalmente e usinando-se uma dessas metades foram feitos os corpos de prova, como é mostrado esquematicamente na Figura 22.

Figura 22: Esquematização da produção dos corpos de prova a partir da usinagem dos lingotes.



Fonte: Autor

As Figura 23 e 24 mostra o lingote após processo de corte antes de ser usinado nas dimensões corretas, para a finalização dos corpos de prova de tração.

Figura 23: Lingote após dois cortes longitudinais

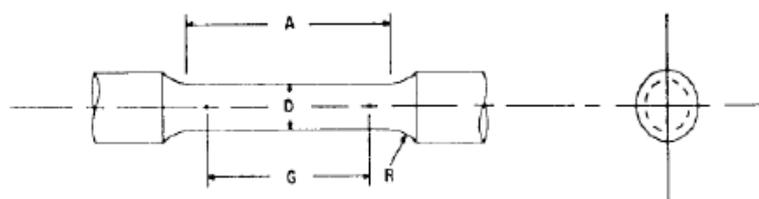


Fonte: Autor

Figura 24: Corpos de prova cortados e prontos para serem usinados

Fonte: Autor

Os corpos de prova foram produzidos seguindo as dimensões proporcionais da norma ASTM E 8M – 038M – 03 Métrico, 2001, como mostra a figura 25.

Figura 25: 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: [31]

A figura 26 mostra os corpos de prova já usinados e prontos para serem ensaiados. Os ensaios foram realizados na máquina de tração (Máquina Universal de Ensaio Mecânico da marca Kratos), a célula de carga de 20 KN.

Figura 26: Corpos de prova de ensaio de tração



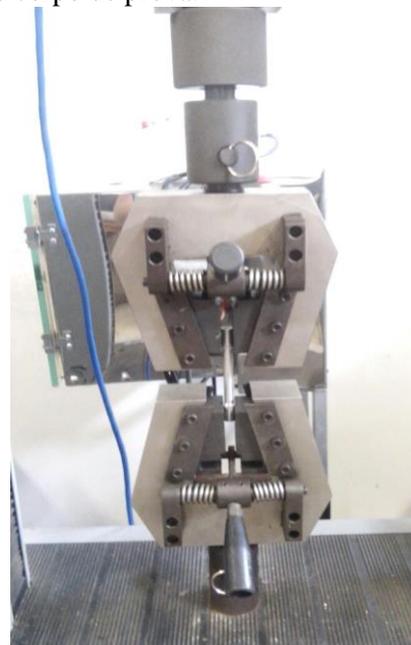
Fonte: Autor

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 27.

Figura 27: (a) corpo de prova posicionado na máquina de ensaios, (b) Visão aproximada da garra que acopla o corpo de prova.



(a)



(b)

Fonte: Autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

6.1.1 Análise da liga Al-Mg

Os lingotes apresentaram apenas a ocorrência de macrossegregação normal, decorrente 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 intervalo de solidificação.

A Figura 28 mostra a macroestrutura obtida pelo lingote após a fundição do material e realização do processo squeeze casting.

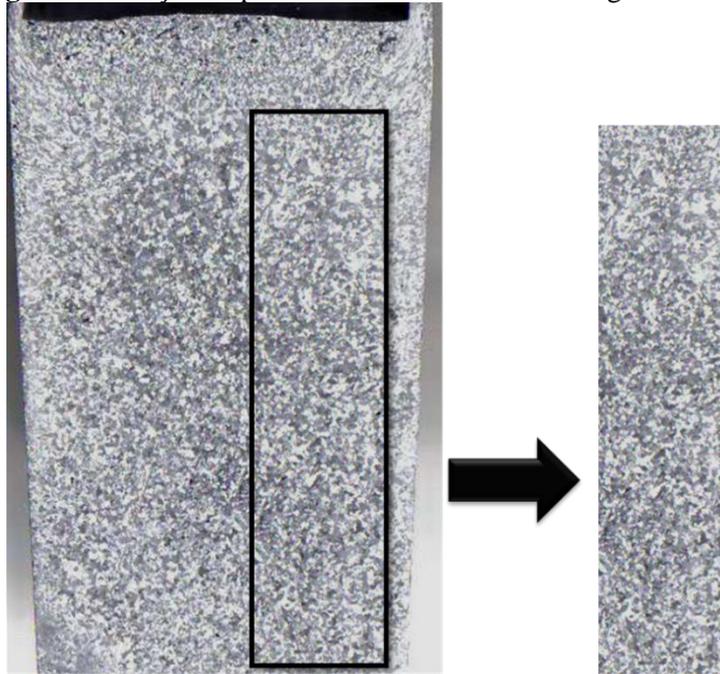
Figura 28: Macroestrutura analisada da liga Al-Mg



Fonte: Autor

A amostra analisada apresentou 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 foi 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 29: secção ampliada da macroestrutura do lingote cortado



Fonte: Autor

Na Figura 29 se observou uma estrutura homogênea, livre de poros, incrustações ou da presença de defeitos de Shrinkage não foram encontrados na macroestrutura da liga.

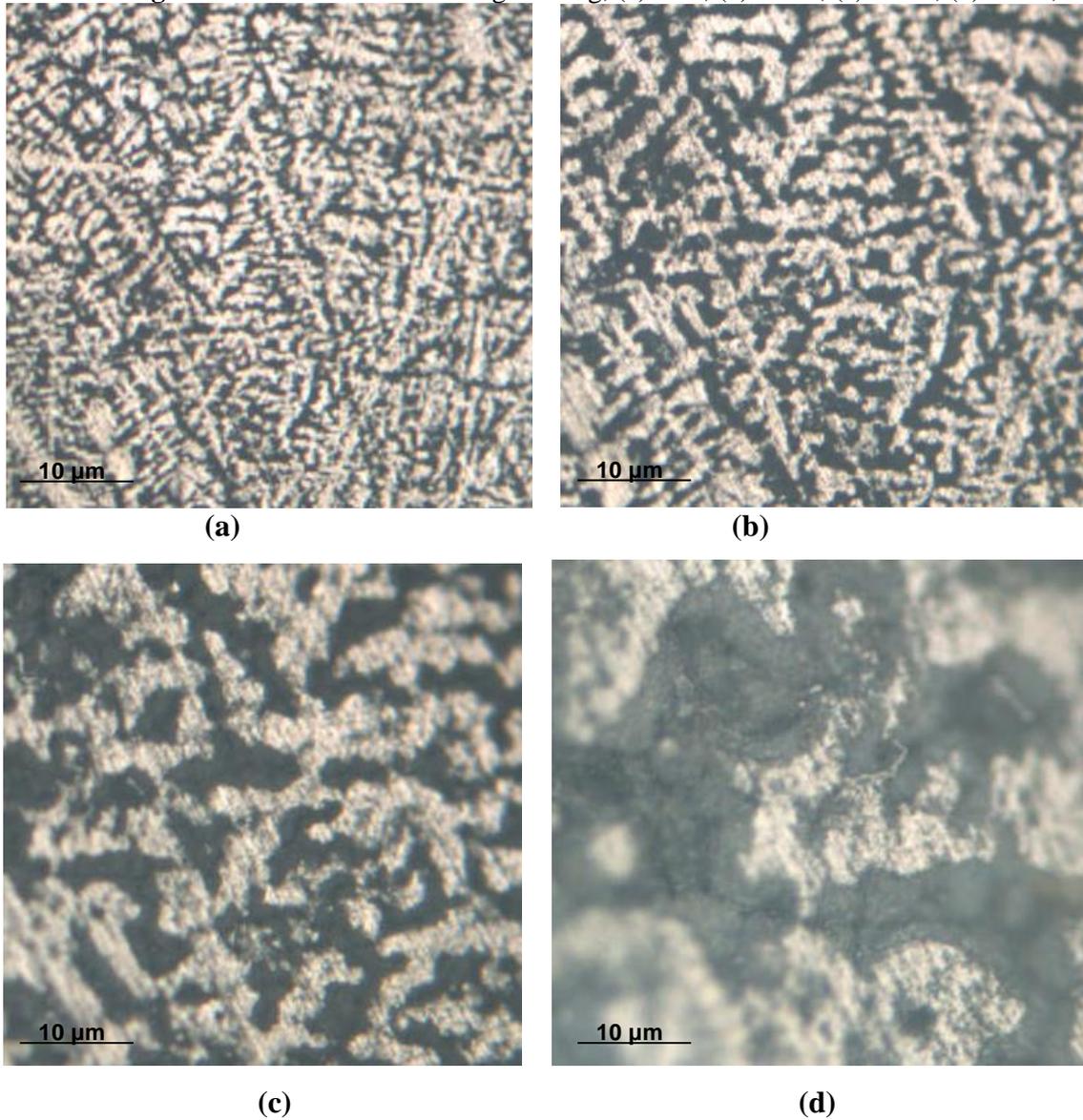
Nas seções mais espessas da peça, onde existe maior probabilidade de aparecimento de porosidade, a pressão fez com que o metal líquido que se encontrava nos pontos mais quentes fosse deslocado para preencher os poros que estão se formando, isso acabou impedindo o seu desenvolvimento.

6.2 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 - 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 [32].

A microestrutura do lingote apresentou um percentual muito pequeno de micro segregações como se pode ver através da figura 30. 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 30: Microestrutura da Liga Al-Mg, (a)50 X, (b) 100X, (c) 200X, (d) 500X,



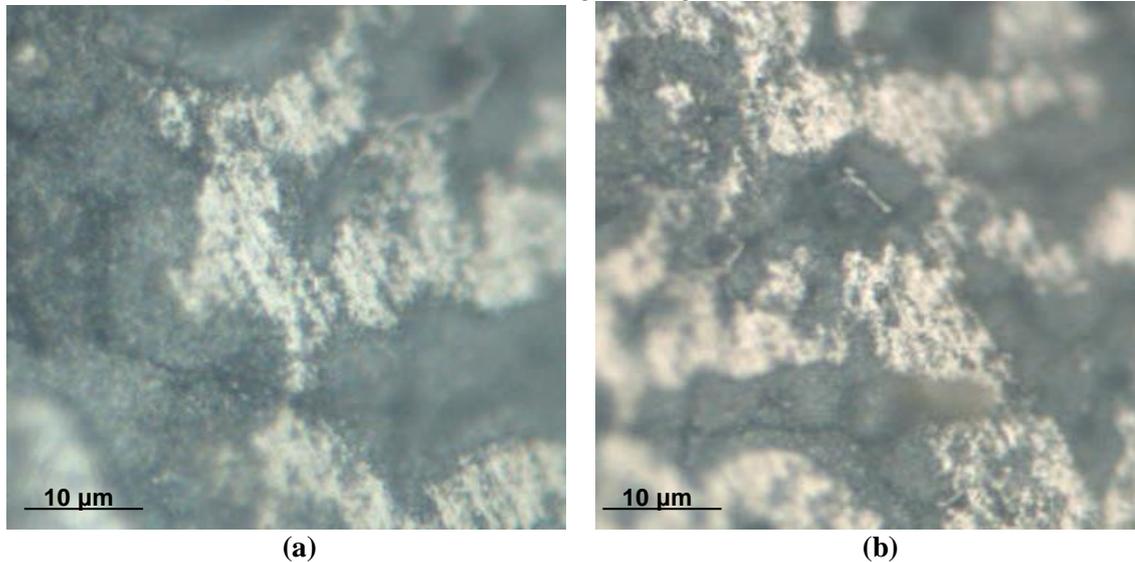
Fonte: Autor

Este defeito quando em grandes percentuais causa impedimento do movimento das discordâncias e ocasiona assim fragilidade do metal em sua conformação e aumento da tendência de propagação de trincas no sofrimento de tensões. Entretanto foram mínimas as micro segregações e quase nenhuma as porosidades presentes vistas pela análise metalográfica, a liga fundida apresenta-se bastante homogênea.

Observou-se que a microestrutura da liga obtida por squeeze casting foi virtualmente livre de poros. O nível de porosidade de estruturas para squeeze casting foi de 0,5% [3].

Foi nula a presença de micro porosidades encontradas nas amostras como se pode notar na figura 31.

Figura 31: Microestrutura da Liga Al-Mg, (a)500X, (b) 1000X.



Fonte: Autor

Não houve a constatação de pontas de dendritas na microestrutura das ligas, isto provavelmente devido a limitações do tipo de ferramenta utilizada para visualização dos grãos.

A não presença de zona colunar nos lingotes ocorreu decorrente de uma serie de fatores, tais como: agitação mecânica e uma rápida velocidade de solidificação proveniente da aplicação de pressão; a concentração e potencial nucleante do soluto; e do razoável tamanho da secção transversal do lingote, que chega a minimizar o efeito de superaquecimento pela elevada troca de calor com a superfície [33].

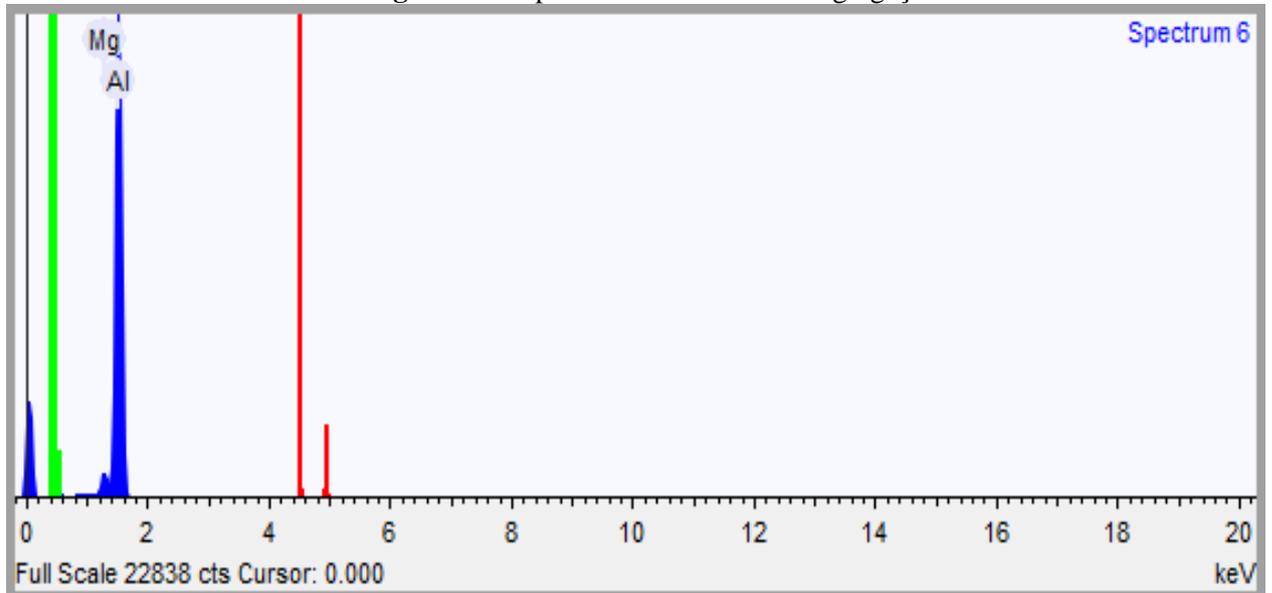
6.3 ANÁLISE QUÍMICA (EDS)

Foi realizada por meio de EDS na amostra retirada de um dos lingotes fundidos. Uma pequena variação percentual de elementos foi constatada, como mostra as Figuras 32 e 33, análise química resultante de uma media das variações percentuais de todas as imagens analisadas.

Os elementos encontrados nas micro segregações são provenientes de Oxigênio Silício. Estes fragmentos exógenos possivelmente oriundos da forte tendência da formação de

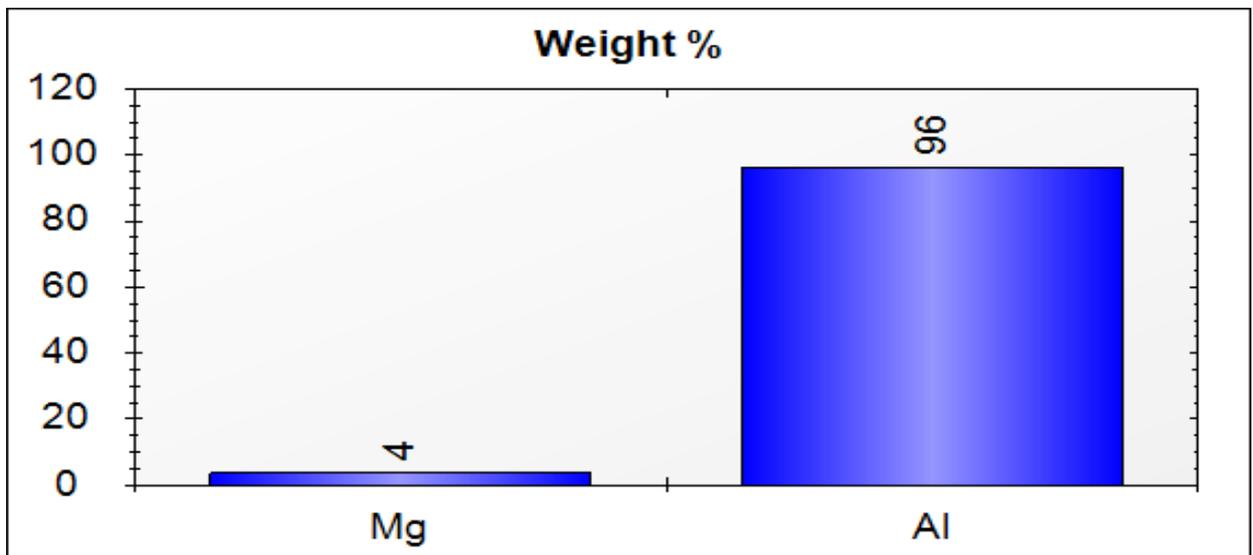
alumina (Al_2O_3), e tendo Silício proveniente do uso de cadinho de SiC no processo de fundição da liga (Figuras 32 – 33).

Figura 32: Espectrômetro das micro segregações.



Fonte: Autor

Figura 33: Composição das micro segregações.



Fonte: Autor

Tabela 2: Representação dos valores percentuais dos elementos, média e desvio padrão.

Nome	O	Mg	Al	Si
Spectrum 1	3,447	4,892	91,243	0,418
Spectrum 2	–	3,867	96,133	–
Spectrum 3	3,622	3,630	92,748	–
Spectrum 4	–	3,598	96,402	–
Spectrum 5	–	3,630	96,370	–
Spectrum 6	–	3,760	96,240	–
Spectrum 7	3,587	3,875	92,539	–
Spectrum 8	–	3,468	96,532	–
Spectrum 9	–	3,197	96,803	–
Spectrum 10	–	4,047	95,953	–
Média		3,796	95,096	
Desv pad		0,4518	2,0634	

Fonte: Autor

6.4 ANÁLISE DE DUREZA

A tabela 3 mostra o resultado referente a media e ao desvio padrão médio de dureza Brinell da amostra do lingote fundido.

Tabela 3: Dureza média e desvio padrão da amostra solidificada

DUREZA (Brinell)	
1	56,5
2	55,4
3	56,8
4	56,7
5	54,6
6	57,6
7	56,5
8	55,5
9	60
10	52,3
MÉDIA	56,19
DESVIO PADRÃO MÉDIO	1,54

Fonte: Autor

A amostra fundida sob pressão apresentou dureza baixa, isso se deve por conta da porcentagem de magnésio presente na liga que faz com que ela seja uma liga mais dúctil. 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 pressão constante e variando a temperatura da lingoteira e a temperatura de vazamento do metal, esta primeira exerce maior influencia na dureza de ligas metálicas produzidas via processo Squeeze Casting.

6.5 LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (LRT)

A Tabela 4 apresenta os resultados apresentados por cada corpo de prova ensaiado sob tração.

Figura 34: Representação de um corpo de prova ensaiado.



Fonte: Autor

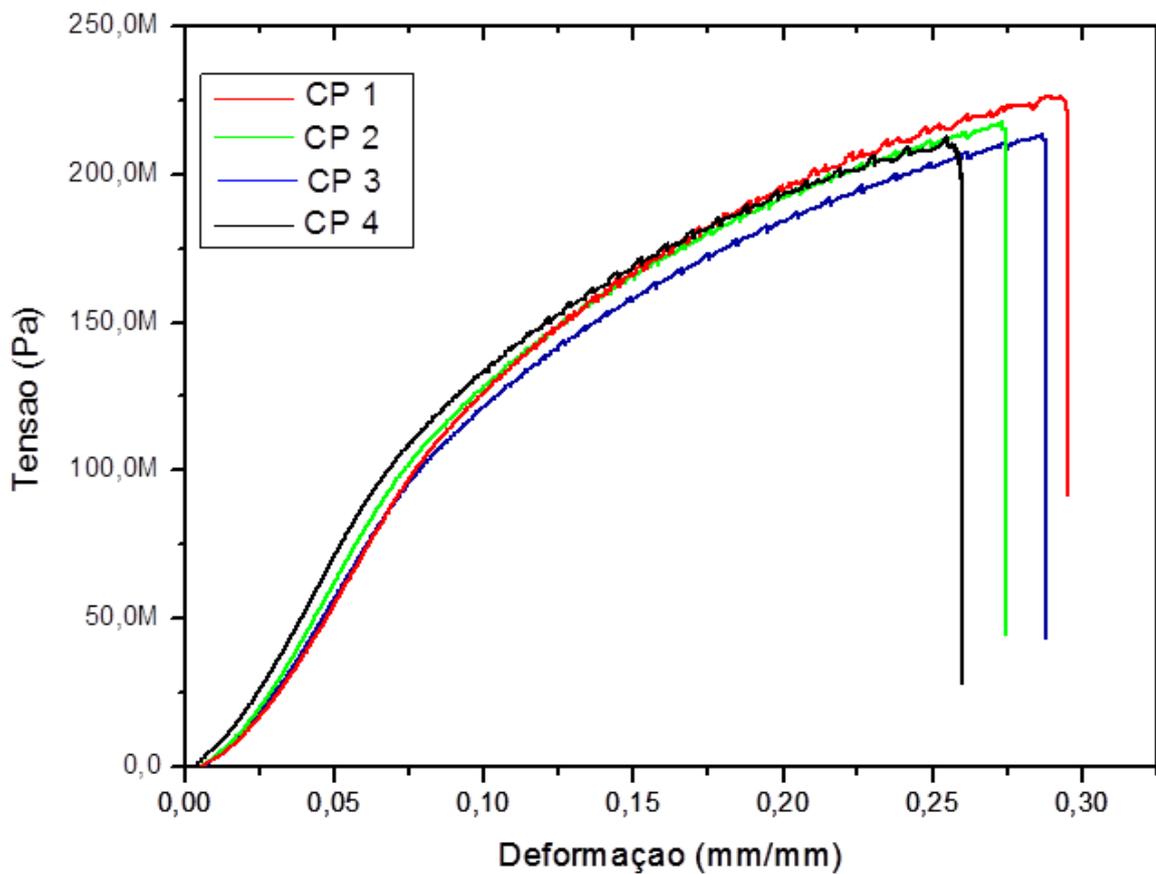
Tabela 4: Resultados do Ensaio de Tração.

CORPO DE PROVA	FORÇA MÁXIMA (N)	DESLOCAMENTO MÁXIMO (mm)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (mm/mm)
1	14949,69	17,21	234,99	0,286825
2	13842,31	16,39	217,59	0,273167
3	12952,34	14,80	203,60	0,246667
4	13518,68	15,28	212,50	0,254667

Fonte: Autor

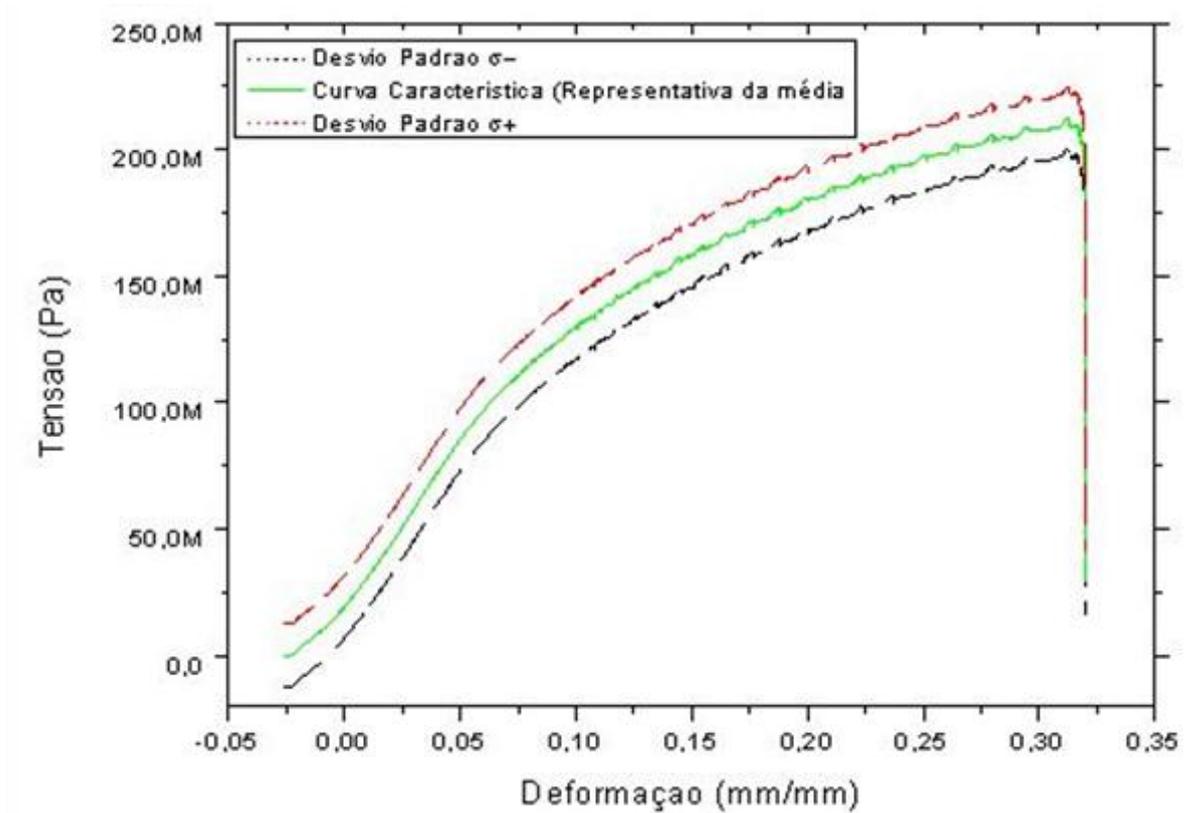
Com os resultados obtidos através do ensaio de tração, pode ser obtido o gráfico da Figura 35, que mostra os resultados para o ensaio de tração que determinou o Limite de Resistência a Tração (LRT) para as amostras com aplicação de pressão pelo processo Squeeze Casting, e o gráfico da Figura 36 que mostra a curva característica, ou seja, uma representação média das curvas que são vistas na Figura 35.

Figura 35: Gráfico da tensão versus deformação para cada corpo de prova ensaiado da liga Al-Mg.



Fonte: Autor

Figura 36: Desvio padrão inferior e superior e curva característica representativa da média.



Fonte: Autor

O gráfico da Figura 35 mostra o limite de resistência à tração em função da pressão para a liga estudada. De modo geral, observa-se que por conta da alta pressão aplicada (100 MPa) o limite de resistência à tração da liga bastante é alto. Em modo de comparação os ensaios realizados por Brito, 2009 com a liga Al-7%Mg por mais que tenha sido utilizado uma pressão mais elevada (120 MPa), o seu maior limite de resistência à tração foi de 150 MPa, enquanto no presente trabalho o maior limite foi de 217,59 MPa. Isso se deve provavelmente, por conta do teor de Mg presente na liga, que causa o refinamento do grão e é o elemento mais efetivo no endurecimento, e por tanto com o teor de 7% de Mg na liga, as peças possuem microestrutura muito refinada e se tornarão muito duras, com uma maior fragilidade e uma menor ductilidade, o que lhe confere uma LTR menor.

Com a diminuição da temperatura, as ligas de alumínio-magnésio não apresentam sensível endurecimento por precipitação com concentrações abaixo de 7% Mg [34]. Para Andrade, 2014, à pressão de 100 MPa a liga Al-3%Zn solidificada por squeeze casting apresentou LRT igual a 80,21 MPa também inferior ao presente trabalho.

O gráfico da Figura 36 apresenta a curva característica que se trata de uma representação média das curvas, ou seja, mostra qual dentre as quatro curvas está mais aproximada da média entre as tensões de cada curva. Juntamente com a curva característica é apresentado desvio padrão no valor de $\pm 1,23$ MPa.

6.5.1 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 constante experimental é de 4,00 na escala de dureza dureza Brinell para alumínio e suas ligas. A expressão a baixo relaciona esse valor com a média de 56,19 HB obtida.

$$\begin{aligned}\sigma_{\mu} &= 4.HB \\ \sigma_{\mu} &= 4 \times 56,19 \\ \sigma_{\mu} &= \mathbf{224,76 \text{ MPa}}\end{aligned}$$

Em que

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

α = constante experimental.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados através dos ensaios de tração e dureza, análise microestrutural e macroestrutural, assim como correlação entre os aspectos de dureza e tração da liga estudada pode-se extrair as seguintes conclusões:

7.1 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, macrossegregação, defeitos de Shrinkage e porosidades. Observou-se, na liga, estruturas preferencialmente equiaxiais tendo uma mudança significativa na redução do tamanho médio de grãos.

7.2 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 – magnésio somado à contração característica do alumínio, o que proporciona o maior surgimento de micro defeitos de fundição.

7.3 ANÁLISE DO LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E DUREZA

Em relação ao limite de resistência a tração, observou-se um aumento no limite de resistência à tração quando comparados com outras ligas da mesma série encontradas na literatura, com aplicação de uma pressão de 100 MPa. Com relação à dureza foram observados baixos valores, o que indica que a liga trabalhada apresentou uma boa ductilidade, que se deve ao percentual de magnésio encontrado na liga sendo o mesmo principal responsável por tal propriedade.

7.4 CORRELAÇÃO ENTRE A DUREZA BRINELL E O LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRACÃO

A comparação entre 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 de 224,76 MPa para a resistência à tração utilizando a dureza Brinell e 217,59 MPa para a média da resistência à tração experimental, pode-se afirmar que os valores encontram-se dentro dos padrões esperados, haja vista que os valores não são exatos e sim aproximados.

REFERÊNCIAS

- [1] MURAKAMI, Y (1991 a), in: *Proc. RASELM '91*: Hirano, K., Oikawa, H., Ikeda, K (Ed). Tokyo: Japan Inst. **Light Metals**, pp. 3-10.
- [2] KANICKI, D. P., **Castings Advantages, Applications, and Market Size, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9^a edition, pp. 37-45, 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] ROHATGI, P., **CAST Metal-Matrix Composites – squeeze casting, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9^a edition, pp. 845-847, 1988.**
- [6] FERREIRA, J. M. G. DE C., **Tecnologia da Fundição**, Fundação Calouste Gulbenkian, pp. 507-518, 1999.
- [7] GHOMASHCHI MR and VIKHROV A. **Squeeze casting: an overview. J Mater Process Technology 2000; 101:1–9.**
- [8] BOLFARINI CLAUDEMIRO E DR. KIMINAMI CLAUDIO. **Processo de fundição "squeeze casting".**
- [9] GARCIA, Amauri. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Editora da Unicamp, Campinas, SP. 2001.
- [10] 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.**

[11] MALEKI, A. et al. **Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM 13 alloy**. IN: Materials Science & Engineering. 2006. p. 135-140.

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

[13] ROOY, E.L., **Introduction to Aluminium and Aluminium Alloys**, IN.: American Society for Metals: **ASM HandBook, vol 2 – Properties and selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 10^a edition**, pp. 17-39, 1990.

[14] MOURA, JORGE ANTONIO, **Atributos do alumínio na arquitetura**. Disponível em <http://jorgeantoniomagalhaesmoura.blogspot.com.br/2012/11/atributos-do-aluminio-na-arquitetura_6.html>. Acesso em 25 de junho 2016.

[15] ABAL (Associação Brasileira do Alumínio), **Fundamentos e aplicações do alumínio**. Disponível em <<http://www.abal.org.br/site/pdf/fundamentos-do-aluminio/001.pdf>>. Acesso 25 de junho 2016.

[16] MARIA LÚCIA AMARANTE DE ANDRADE, JOSÉ RICARDO MARTINS VIEIRA, LUIZ MAURÍCIO DA SILVA CUNHA, **Latas para cervejas e refrigerantes: o desafio alumínio x aço**.

[17] **LACRES OU ANÉIS DE LATINHAS DE ALUMÍNIO. MITOS E VERDADES**. Disponível em <http://sucatas.com/portal/reciclagem/mat_didatico_view/309-LACRES-ou-ANEIS-de-latinhas-de-aluminio-Mitos-e-verdades-0>. Acesso em 26/06/2016.

[18] BARBOSA, C.; **Metais não Ferrosos e suas Ligas – Microestrutura, Propriedades e Aplicações**, Editora E-papers, 2014. 532 pgs.

[19] METALOGRAFIA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS. **Uma abordagem prática.** Disponível em <<http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acessado em 29 de Outubro de 2016.

[20] O ENSAIO METALOGRÁFICO. **Controle da qualidade.** Disponível em <http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf>. Acessado em 10 de Outubro de 2016.

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

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

[23] 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.

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

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

[26] GARCIA A. (2000). **“Ensaio dos materiais”.** Livros técnicos e científicos Editora.

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

[28] BEER, Ferdinand Pierre; JOHNSTON Jr, E. Russell, **Resistência dos materiais.** Tradução e revisão técnica Celso Pinto Moraes Pereira – 3ª ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995. 1255 p.

[29] CRISTIE DIEGO PIMENTA , MESSIAS BORGES SILVA , VALÉRIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON, RICARDO BATISTA PENTEADO , FABRICIO MACIEL GOMES. **Aplicação das metodologias Desirability e Simplex para otimização das propriedades mecânicas em arames de aço temperados**, 2015.

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

[31] SILVA, DIEGO VILAR DA. **Influência de parâmetros operacionais na microestrutura e propriedades mecânicas de ligas diluídas do sistema Al-Zn solidificadas através do processo squeeze casting**. Janeiro de 2015.

[32] VAN HORN, K.R. - "**Aluminum, v.1, ASM**", 1 st printing, Metals Park, Ohio, 1967, p.324-327.

[33] MULLER, Arno. **Solidificação e Análise dos Metais**. Editora da UFRGS, Porto Alegre, RS.2002.

[34] COSTA. ANDRÉ LUIZ DE MORAES. **Processo de fundição (squeeze casting)**. 2000. 3pg. Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.