



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RODRIGO SAMPAIO DOS SANTOS

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DA LIGA Al-Mg-Zn
SOLIDIFICADA ATRAVÉS DO METODO DE SOLIDIFICAÇÃO “SQUEEZE
CASTING”**

MARABÁ

2013

RODRIGO SAMPAIO DOS SANTOS

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DA LIGA Al-Mg-Zn
SOLIDIFICADA ATRAVÉS DO METODO DE SOLIDIFICAÇÃO “SQUEEZE
CASTING”**

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

MARABÁ

2013

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

Santos, Rodrigo Sampaio dos

Análise de resistência ao impacto da liga Al-Mg-Zn solidificada através do método de solidificação Squeeze Casting / Rodrigo Sampaio dos Santos ; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

1. Solidificação. 2. Ligas (Metalurgia). 3. Resistência de materiais. 4. Fundição. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 669.94

RODRIGO SAMPAIO DOS SANTOS

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DA LIGA Al-Mg-Zn
SOLIDIFICADA ATRAVÉS DO METODO DE SOLIDIFICAÇÃO “SQUEEZE
CASTING”**

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

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Bancada Examinadora:

Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra
ORIENTADOR – UFPA - FEMAT

Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques
EXAMINADOR – UFPA - FEMAT

Prof. Dr. Luiz Moreira Gomes
EXAMINADOR – UFPA - FAFIS

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por ter sempre me presenteado com forças e esperanças para transpor os momentos difíceis.

Aos meus pais, irmã e entes queridos por apoiarem sempre meus estudos, planos e escolhas. Por estarem sempre junto a mim quando necessito.

Aos professores, principalmente a Marcio Mafra e Luis Fernando Nazaré Marques, que sempre somaram conhecimento e apresentaram desafios acreditando em meu potencial.

Aos membros e apoiadores da equipe de *AeroDesign* de 2011, esta que sem dúvida ensinou-me o verdadeiro significado da palavra desafio.

Por fim, porém não menos importante, a todos os amigos e conhecidos queridos da faculdade que sempre estiveram junto a mim nas noites de estudo, trabalhos e vésperas de prova.

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. Este aplicado às ligas de Alumínio e Magnésio modifica consideravelmente a estrutura do metal quando comparado aos demais métodos. O processo consiste no vazamento do metal em uma coquilha metálica e sua solidificação ocorre sob pressão ocasionada pelo pressionamento de um punção, pressão essa que varia a reação eutética da solidificação do metal. Uma desvantagem dos processos convencionais de fundição é a formação de bolhas, porosidades, defeitos de *Schinkage* e macrosegregação que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas dos produtos fundidos. Neste trabalho analisou-se as alterações estruturais e mecânicas a impacto da liga Al-Mg-Zn solidificada sob pressão, e com uso da variação da composição de Zn em 0%, 1%, 2% e 3%, dentro da liga Al-7%Mg. Selecionada através do histórico de bons resultados na literatura de solidificação por *squeeze casting*. Observou-se que a pressão exerceu influência na macroestrutura diminuindo a presença dos defeitos de fundição, na microestrutura final, o aumento da pressão diminuiu o espaçamento dendrítico secundário, sendo observado dessa forma um aumento da taxa de resfriamento. Este processo contribuiu para a seleção de uma liga de Al-Mg-Zn com mínimos defeitos de fundição e melhores resultados de resistência ao impacto para as composições analisadas.

Palavras-chave: Liga Al-Mg-Zn; Squeeze Casting; Resistência ao impacto.

ABSTRACT

The foundry is often considered one of the oldest, if not the most versatile process for manufacturing metal components, inside foundry the squeeze casting is an innovative process. This applied to aluminum and magnesium alloys considerably modifies the structure of the metal when compared to other methods. The process consists in pouring the metal in a metallic permanent mold and solidification occurs under pressure caused by pressing a punch, which pressure varies reaction eutectic solidification of the metal. A disadvantage of conventional foundry processes is the formation of bubbles, pores, defects Schinkage and macrosegregation which directly influence on the mechanical properties of the cast products. In this study we analyzed the structural and mechanical impact of the alloy Al-Mg-Zn solidified under pressure and with use of variation in the composition of Zn 0%, 1%, 2% and 3% in the Al-alloy 7% Mg. Selected through the history of good results in the literature solidification by squeeze casting. It was observed that the pressure exerted influence on decreasing the macrostructure presence of casting defects in the final microstructure, the increased pressure reduced the secondary dendritic spacing, being observed thus increased cooling rate. This process contributed to the selection of an alloy of Al-Zn-Mg casting defects with minimal results and better impact resistance for the composition analyzed.

Keywords: Alloy Al-Mg-Zn; Squeeze Casting; Resist impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta.....	14
Figura 2 – Classificação dos tipos de fundição sob pressão levando-se em conta a geometria da peça: (a) direta, (b) com extrusão e (c) indireta.	14
Figura 3 – Máquina de ensaio.....	15
Figura 4 – Corpo de prova para ferro fundido e não ferrosos fundidos sob pressão.	16
Figura 5 – Tipo de corpos de prova Charpy.....	17
Figura 6 – Corpo de prova Izod.....	18
Figura 7 – Método de fixação dos corpos de prova.....	19
Figura 8 – Layout da lingoteira utilizada na pesquisa.....	23
Figura 9 – Posicionamento dos termopares para obtenção das temperaturas.....	23
Figura 10 – Diagrama da liga Al-7%Mg-1%Zn.....	23
Figura 11 – Diagrama da liga Al-7%Mg-2%Zn.....	24
Figura 12 – Diagrama da liga Al-7%Mg-3%Zn.....	25
Figura 13 – Corpos de Prova utilizados.....	26
Figura 14 – Máquina de ensaio utilizada.....	27
Figura 15 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-0%Zn.....	28
Figura 16 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-1%Zn.....	28
Figura 17 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-2%Zn.....	28
Figura 18 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-3%Zn.....	29
Figura 19 – Análise química da Liga Al-7%Mg-0%Zn.....	29
Figura 20 – Análise química da Liga Al-7%Mg-1%Zn.....	30
Figura 21 – Análise química da Liga Al-7%Mg-2%Zn.....	30
Figura 22 – Análise química da Liga Al-7%Mg-3%Zn.....	31
Figura 23 – Microestrutura da liga Al-7%Mg: (a) 0% Zn,(b) 1% Zn,(c) 2% Zn e (d)3% Zn.	32
Figura 24 – Medida dos grãos.....	34
Figura 25 – Variação do tamanho médio dos grãos.	35
Figura 26 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg (a)1000 X (b) 500X.	36
Figura 27 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg-1%Zn (a)1000 X (b) 500X.....	36
Figura 28 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg-2%Zn (a)1000 X (b) 500X.....	37
Figura 29 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg-3%Zn (a)1000 X (b) 500X.....	37
Figura 30 – Espectrômetro das microsegregações.....	38
Figura 31 – Composição das microsegregações.....	39
Figura 32 – Resultado do ensaio de impacto.....	40
Figura 33 – Fratura dos corpos de prova.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 –Resultado do ensaio de impacto (Energia Absorvida – Joule (J)).....	40
---	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	OBJETIVOS.....	12
1.1.1.	OBJETIVO GERAL.....	12
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	13
2.1.	SQUEEZE CASTING.....	13
2.2.	LIGA Al-Mg-Zn.....	15
2.3.	ENSAIO DE IMPACTO.....	16
3.	METODOLOGIA	22
3.1.	MATERIAL.....	22
3.2.	PARÂMETROS DO PROCESSO.....	23
3.3.	ANALISE MACROESTRUTURAL E MICROESTRUTURAL.....	25
3.4.	ANALISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	26
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1.	ANALISE QUÍMICA.....	28
4.2.	ANALISE MACROESTRUTURAL.....	32
4.2.1.	MACROESTRUTURA DA LIGA.....	32
4.2.2.	DEFEITOS NA MACROESTRUTURA.....	34
4.2.3.	TAMANHO MÉDIO DE GRÃO.....	34
4.3.	ANALISE MICROESTRUTURAL.....	36
4.4.	ANALISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	40
5.	CONCLUSÕES	41
5.1.	ANALISE MACROESTRUTURAL.....	41
5.2.	ANALISE MICROESTRUTURAL.....	41
5.3.	ANALISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	41
6.	REFERENCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

Dentre os métodos de obtenção de peças metálicas, a fundição é um dos mais antigos, se não, 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. Entre todos os métodos de fundição o conhecido como *squeeze casting* tem destaque por estar dentre os inovadores.

O processo de *squeeze casting* consiste basicamente na solidificação do metal em um molde metálico sob a aplicação de altas pressões unindo qualidade, economia e simplicidade. O processo tenta combinar as vantagens das tecnologias de fundição e forjamento. A pressão aplicada e o contato instantâneo do metal - líquido com a superfície do molde gera uma condição de rápida transferência de calor e produz uma peça livre de poros e de granulação fina; esta peça tem propriedades mecânicas próximas daquelas de um produto forjado combinadas com as formas e baixo custo das peças fundidas [1,2].

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, proporcionando máxima densidade e uma transferência de calor extremamente rápida resultando em um material de granulação fina e com excelentes propriedades mecânicas.

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 [1]. 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 [4].

Tendo ligas de Alumínio, fabricadas por métodos de fundição, com variação de percentual entre 0,5% - 3% de Zinco e combinadas com Magnésio, produzirem alta resistência ao impacto, alta resistência à tração e excelente ductilidade [5]. O uso dos benefícios do método de solidificação por pressão (*squeeze casting*) como forma de obtenção desta liga foi inevitável. O intuito da utilização deste método é de minimizar os defeitos obtendo assim maior eficiência e confiabilidade nos resultados.

Este trabalho tem como foco a análise da influência da variação do percentual do soluto zinco, na macroestrutura, microestrutura e resistência ao impacto da liga Al-7wt%Mg solidificada através do processo *squeeze casting*.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo, uma análise qualitativa da resistência ao impacto da liga de Al-Mg-Zn, esta obtida através do processo de solidificação sobre pressão “*squeeze casting*”.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar e determinar os parâmetros operacionais inerentes ao processo, tais como: composição, pressão, temperatura e tempo.
- Desenvolver as amostras das Ligas de Al-Mg-Zn, pelo método *Squeeze casting*, para então analisá-las.
- Realizar análise química para certificar que os ensaios serão desenvolvidos nas composições corretas.
- Analisar a macroestrutura das ligas para descrever possíveis defeitos e tamanho médio de grãos.
- Analisar a microestrutura das ligas e correlacionar os resultados com as propriedades mecânicas – resistência ao impacto – em função do tamanho médio de grão.
- Determinar a composição da liga analisada que apresentou maior resistência ao impacto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1. 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. Entretanto, o primeiro experimento científico sobre o assunto só foi realizado em 1931 na Alemanha por V. G. Welter com uma liga Al-Si [2].

Posteriormente, 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*.

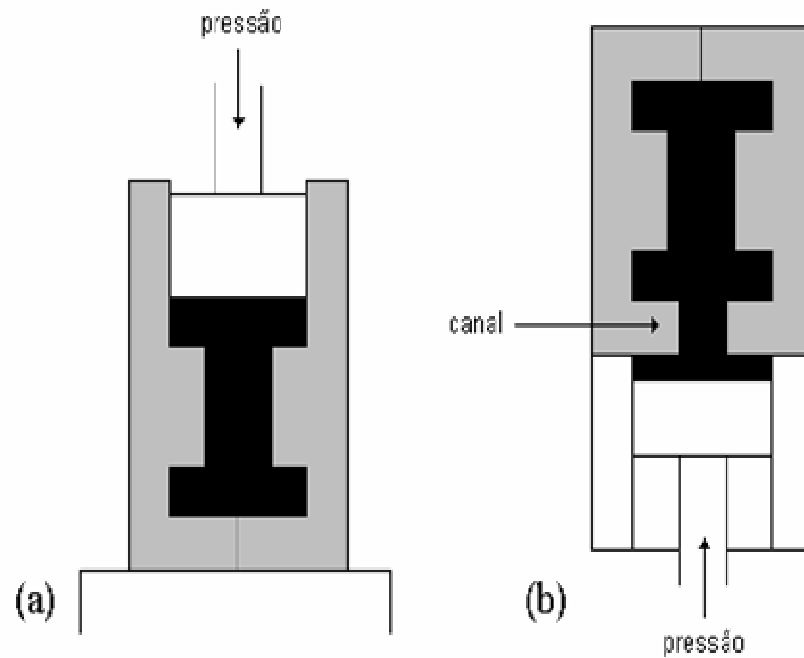
Apenas em 1965 se iniciaram as atividades de pesquisa e desenvolvimento do processo nos Estados Unidos, Europa Ocidental e Japão; desde então estes países iniciaram a produção em escala industrial de ligas não-ferrosas através de *squeeze casting*. Atualmente, componentes de ferro fundido e aço inoxidável são também produzidos.

Com o passar dos anos e um constante aperfeiçoamento da técnica, dois tipos de *squeeze casting* são utilizados: 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.

A técnica de pressão indireta é mostrada na figura 1(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.

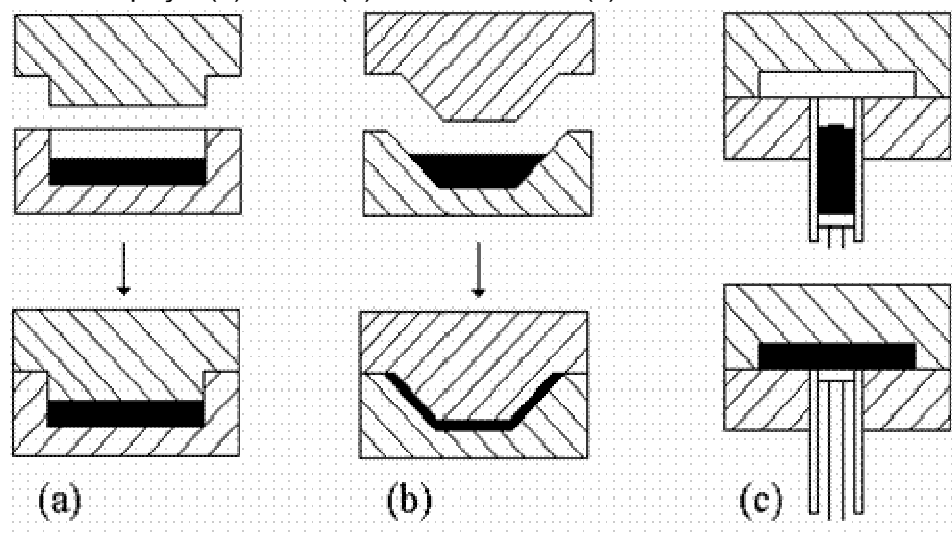
Com esta técnica é difícil manter a peça sobre alta pressão durante todo o tempo de solidificação, ou seja, é difícil trabalhar com ligas possuindo grande intervalo de solidificação. Alternativamente, levando-se em consideração a forma da peça, a prensagem também pode ser classificada como direta, com extrusão e indireta sem extrusão (figura 2) [2].

Figura 1 – Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta.



Fonte:[2].

Figura 2 – Classificação dos tipos de fundição sob pressão levando-se em conta a geometria da peça: (a) direta, (b) com extrusão e (c) indireta.



Fonte:[2].

O processo *squeeze casting* tenta combinar as vantagens das tecnologias de fundição e forjamento: a pressão aplicada e o contato instantâneo do metal líquido com a superfície do molde geram uma condição de rápida transferência de calor e produz uma

peça livre de poros e de granulação fina; esta peça tem propriedades mecânicas próximas daquelas de um produto forjado combinadas com as formas e baixo custo das peças fundidas [1,2].

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) [1,2].

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

2.2. LIGA Al-Mg-Zn

As ligas Al-Mg (série 5XXX) 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). Além desse ganho de resistência mecânica, o magnésio permite a essas ligas manterem um elevado nível de ductilidade, tenacidade e resistência mecânica, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade [5]

Em ligas de Alumínio fabricadas por meio de fundição, um percentual de 0,5% - 3% de Zinco em combinação com o Magnésio produz alta resistência ao impacto, alta resistência à tração e excelente ductilidade, porém em altos teores produz alta contração e fragilidade a quente [6].

Para a liga Al-7%Mg, tendo como foco a menor formação de defeitos e a utilização do método de solidificação sob pressão, a mesma apresentou melhores resultados [7].

Na liga de Al-Mg, a medida que se eleva o valor do teor de Magnésio até os 10%, não ocorre uma mudança significativa na macroestrutura das ligas, ou seja, verificam-se estruturas preferencialmente equiaxiais [7].

Nas liga de Al-7%Mg os defeitos são eliminados para pressões superiores a 40 MPa a pressão não influencia de forma significativa na eliminação dos defeitos de fundição, principalmente para pressões superiores a 80 MPa [7].

2.3. ENSAIO DE IMPACTO

Este é um dos ensaios que permitem estudar os efeitos das cargas dinâmicas, muito utilizado para medir a tendência de um metal de se comportar de maneira frágil. Como este trabalho foi realizado utilizando o método de fundição por *squeeze casting* e ainda para uma liga suscetível propriedades de resistência ao impacto, o ensaio de impacto se torna o mais indicado para que constatemos uma minimização de defeitos e otimização de resistência.

No ensaio de impacto, o choque representa um esforço de natureza dinâmica, visto que a carga é aplicada repentina e bruscamente.

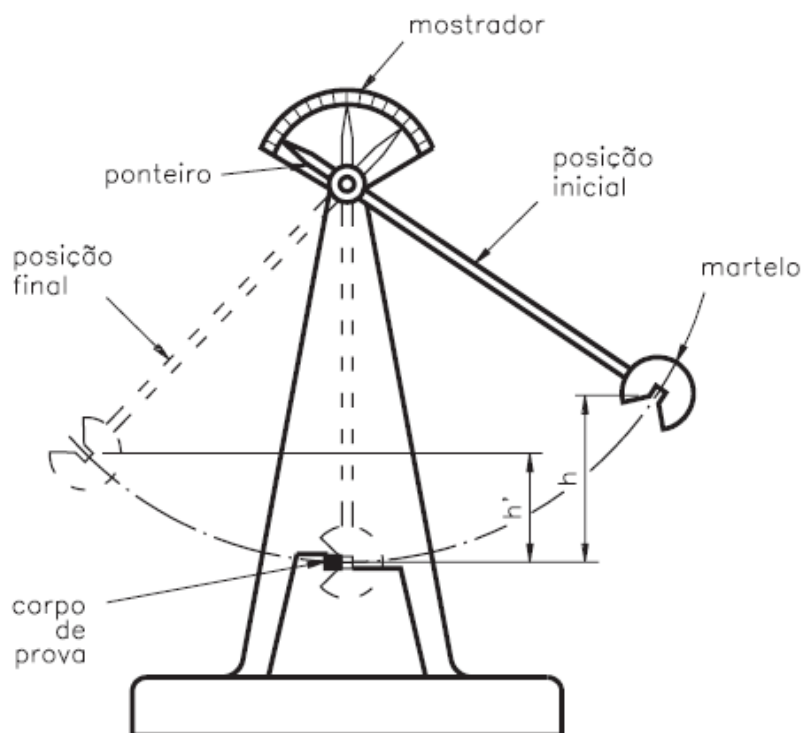
Consiste em medir a quantidade de energia absorvida por uma amostra do material, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido.

O método mais comum para ensaiar metais é o do golpe, desferido por um peso em oscilação.

A máquina é provida de um martelo pendular. O pêndulo é levado a uma certa posição, onde adquire uma energia inicial. Ao cair, ele encontra no seu percurso o corpo de prova, que se rompe.

A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia final (Figura – 3).

Figura 3 – Máquina de ensaio.



Fonte: [8].

A diferença entre as energias inicial e final corresponde à energia absorvida pelo material.

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de energia adotada é o joule [8]. Em máquinas mais antigas, a unidade de energia pode ser dada em $\text{kgf} \cdot \text{m}$, $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ ou $\text{kgf} \cdot \text{mm}$.

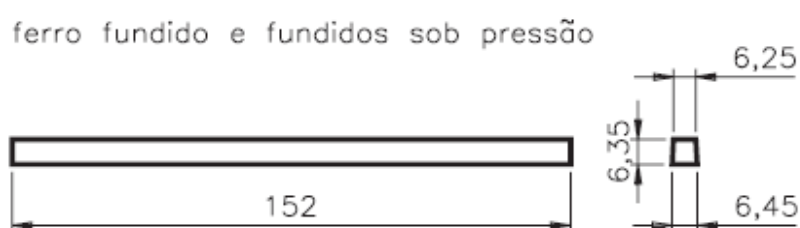
A máquina é dotada de uma escala, que indica a posição do pêndulo, e é calibrada de modo a indicar a energia potencial.

No ensaio de impacto, a massa do martelo e a aceleração da gravidade são conhecidas. A altura inicial também é conhecida. A única variável desconhecida é a altura final, que é obtida pelo ensaio.

1.3.1. Corpos de prova

Utilizam-se duas classes de corpos de prova com entalhe: o Charpy e o Izod. Há um tipo especial para ferros fundidos e ligas não ferrosas fundidas sob pressão conforme figura 04. Todos esses corpos de prova seguem especificações de normas internacionais, baseada na norma americana E-23 da ASTM [8].

Figura 4 – Corpo de prova para ferro fundido e não ferrosos fundidos sob pressão.



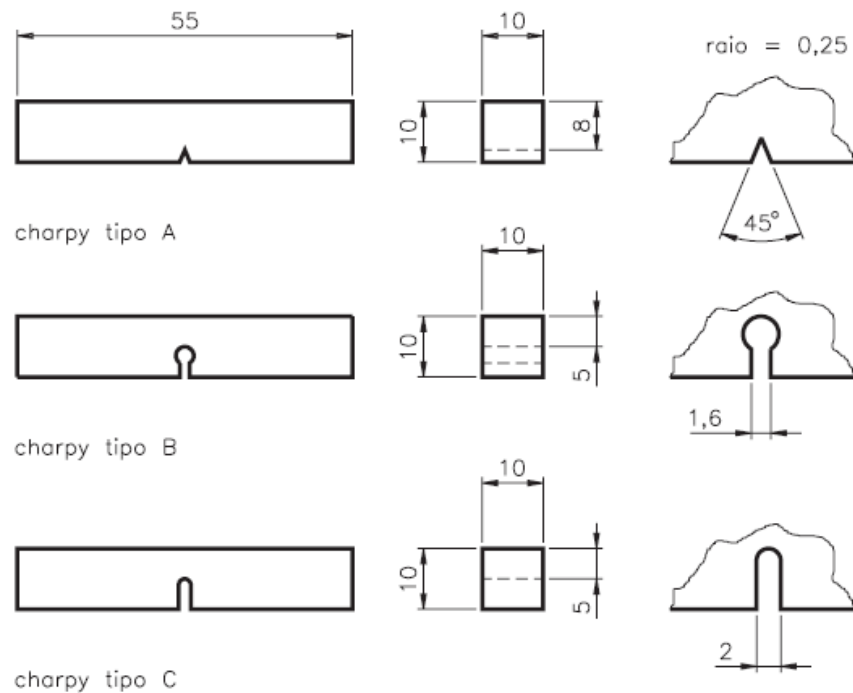
Fonte: [8].

A realização do ensaio necessitou utilizar corpos de prova convencionais para não fundidos sob pressão. Isto devido esta análise está sendo realizada de forma qualitativa, e ainda os equipamentos de lingoteira disponíveis não atenderem os padrões necessários (altura de lingoteira menor que 152 mm) para corpos de prova de impacto para fundidos sob pressão.

Os corpos de prova Charpy que foram selecionados, compreendem três subtipos (A, B e C), de acordo com a forma do entalhe [8].

A figura 05 mostra as formas e dimensões desses três tipos de corpos de prova e dos respectivos entalhes.

Figura 5 – Tipo de corpos de prova Charpy.



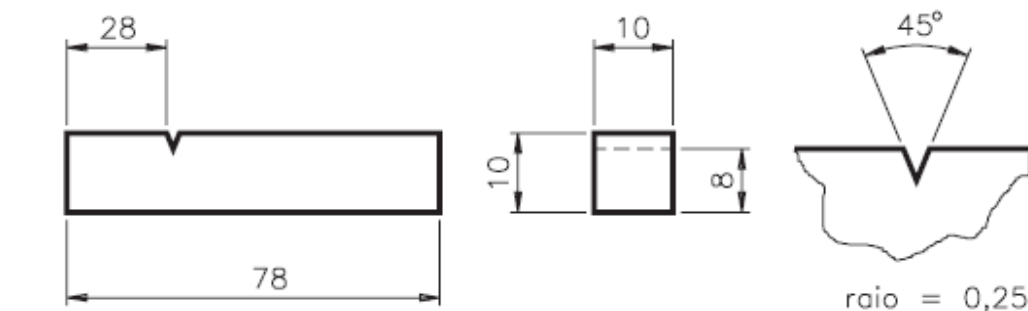
Fonte: [8].

As diferentes formas de entalhe são necessárias para assegurar que haja ruptura do corpo de prova, mesmo nos materiais mais dúcteis.

Quando a queda do martelo não provoca a ruptura do corpo de prova, o ensaio deve ser repetido com outro tipo de corpo de prova, que apresente entalhe mais severo, de modo a garantir a ruptura. Dos três tipos apresentados, o C é o que apresenta maior área de entalhe, ou seja, o entalhe mais severo. O corpo de prova Izod (figura 6) tem a mesma forma de entalhe do Charpy tipo A, localizada em posição diferente (não centralizada) [8].

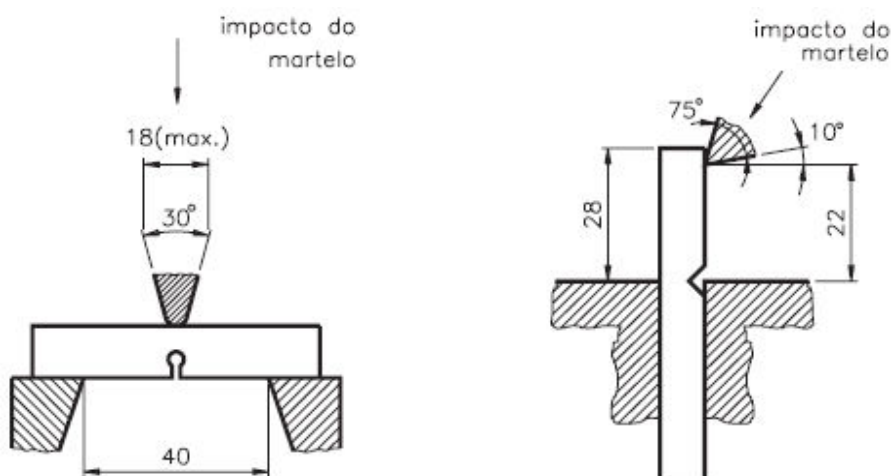
Figura 6 – Corpo de prova Izod.

izod tipo D



Fonte:[8].

O corpo de prova Charpy confeccionado com as dimensões da figura 5 é apoiado na máquina, conforme a figura 6, e o Izod é engastado o que justifica seu maior comprimento.

Figura 7 – Método de fixação dos corpos de prova.

Fonte:[8].

A única diferença entre o ensaio Charpy e o Izod é que no Charpy o golpe é desferido na face oposta ao entalhe e no Izod é desferido no mesmo lado do entalhe [8].

O tipo Charpy foi selecionado devido ao ferramental de ensaio disponível em laboratório, limitado para corpos de prova Charpy.

As dimensões do corpo de prova, a forma e o tamanho do entalhe usado determinam um dado estado de tensões que não se distribuem de modo uniforme por todo

o corpo de prova, no ensaio. Por isso, esse ensaio não fornece um valor quantitativo da tenacidade do metal [8].

A energia medida é um valor relativo e serve apenas para comparar resultados obtidos nas mesmas condições de ensaio. Isso explica por que os resultados desse ensaio não têm aplicação nos cálculos de projetos de engenharia [8].

Mesmo tomando-se todos os cuidados para controlar a realização do ensaio, os resultados obtidos com vários corpos de prova de um mesmo metal são bastante diversos. Para chegar a conclusões confiáveis a respeito do material ensaiado, é recomendável fazer o ensaio em pelo menos três corpos de prova [8].

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAL

Para a produção das ligas de Al-Mg-Zn, foram utilizados materiais considerados comercialmente puros. Este trabalho analisou a estrutura da liga quando solidificada sob pressão, desde análise de macroestrutura à microestrutura. A liga foi obtida fundindo o alumínio com uma temperatura e vazamento de 700°C fornecendo energia suficiente para a difusão na adição dos solutos de magnésio e zinco, o que ocorreu fora do forno de fundição. Posteriormente a liga foi refundida e em seguida vazada na lingoteira sob a prensa onde foi executada a pressurização. A análise de impacto da macro e microestrutura foi realizada utilizando um lingote para cada composição.

A determinação da quantidade de massa dos elementos de liga para então fundilos deu-se mediante o cálculo baseado na Equação (3.1) [9], que leva em consideração a densidade de cada elemento, concentração de soluto da liga, e volume total da liga.

As Equações (3.1) e (3.2) abaixo demonstra o cálculo realizado para obtenção do valor de massa de magnésio, alumínio e zinco para confecção da liga.

$$m_{Al} = \frac{C_{Al} \times V \times d_{Al} \times d_{Mg}}{((C_{Al} \times d_{Mg}) + (C_{Mg} \times d_{Al}))} \quad \text{Equação (3.1)}$$

$$m_{Al+Mg} = \frac{C_{Al+Mg} \times V \times d_{Al+Mg} \times d_{Zn}}{((C_{Al+Mg} \times d_{Zn}) + (C_{Zn} \times d_{Al+Mg}))} \quad \text{Equação (3.2)}$$

Onde:

C = concentração

V = volume de material

d = densidade

Al = alumínio

Mg = magnésio

Zn = zinco

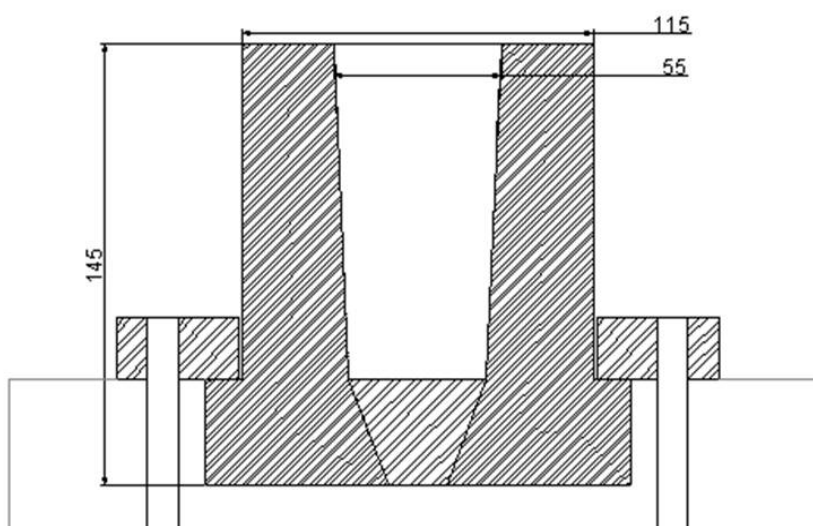
3.2. PARÂMETROS DO PROCESSO

Para a realização do experimento utilizou-se uma lingoteira de aço ASTM 1045 com as seguintes dimensões: diâmetro externo 115 mm, diâmetro interno 55 mm, altura externa 145 mm e altura interna 95 mm, de formato de tronco de cone para facilitar retirada do lingote, Figura 8.

Com uso de um cadinho modelo Salamander SiC AS8 os metais foram fundidos e homogeneizados. A lingoteira foi pré-aquecida a uma temperatura de 300°C, o metal líquido foi vazado a 700°C, para o punção adotou-se 100°C de temperatura, estes com uso de termopares de Ni-Cr tipo K. O tempo de pressão aplicado logo a após o vazamento do metal na lingoteira foi de 30 s.

Para exercer a pressão necessária ao processo utilizou-se uma prensa hidráulica HIDRAUMAX PEH 100 com capacidade máxima de 100 toneladas , aplicando-se aos lingotes a pressão de 20 toneladas (80 Mpa), segundo [10 ; 11], pressão ótima, não apresentando relevantes alterações na morfologia da liga uma aplicação de maiores pressões.

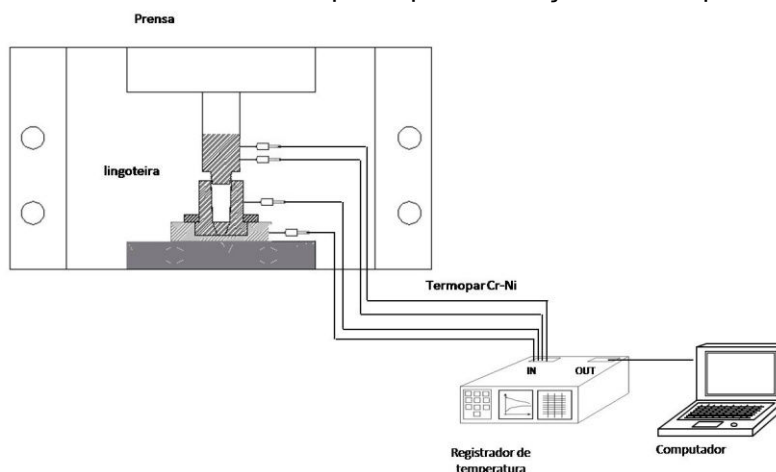
Figura 8 – Layout da lingoteira utilizada na pesquisa.



Fonte:[12].

A Figura 9 mostra como ocorreu a montagem do sistema experimental e posicionamento dos termopares na lingoteira e no punção para monitoração das temperaturas de parâmetros do processo.

Figura 9 – Posicionamento dos termopares para obtenção das temperaturas.

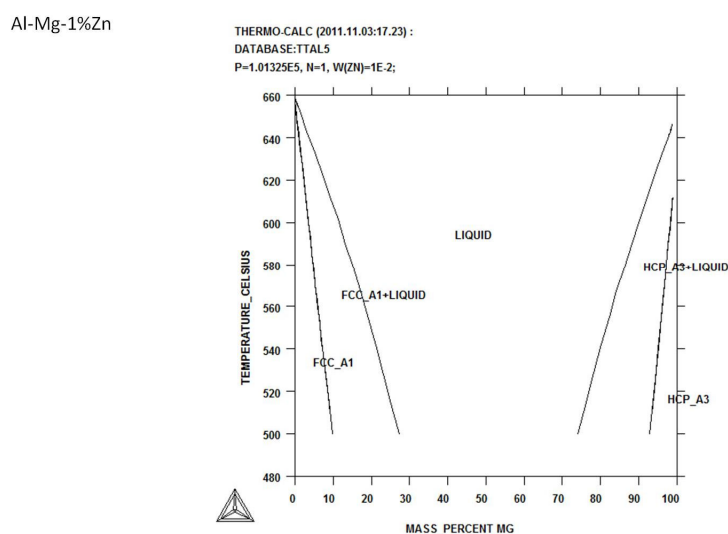


Fonte: [12].

As figuras 10, 11 e 12 determinam como foi realizado a análise da temperatura líquida da liga, esta para utilização no controle de parâmetros de vazamento e de inserção de solutos na liga.

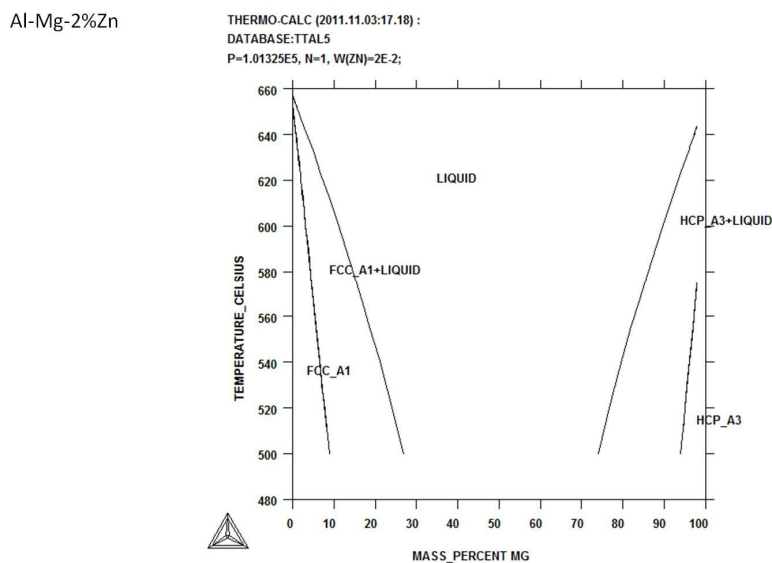
Os diagramas foram gerados com uso do software Thermo-Calc 3.0.

Figura 10 – Diagrama da liga Al-7%Mg-1%Zn.



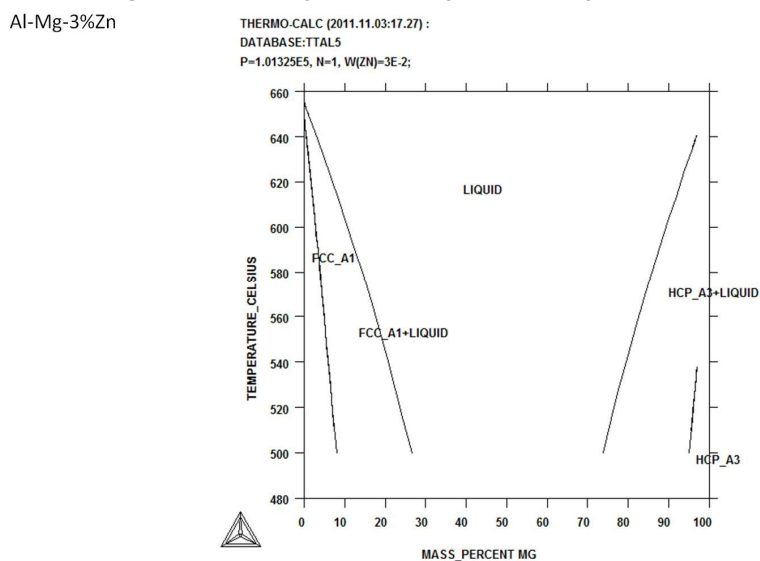
Fonte: Autor, 2011.

Figura 11 – Diagrama da liga Al-7%Mg-2%Zn.



Fonte: Autor, 2011.

Figura 12 – Diagrama da liga Al-7%Mg-3%Zn.



Fonte: Autor, 2011.

3.3. ANALISE MACROESTRUTURAL E MICROESTRUTURAL

Para ambas análises os 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 Microns. A macroestrutura foi revelada com ataque do reagente químico Keller's [7](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 zinco 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.

3.4. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Na análise de resistência ao impacto, optou-se em utilizar o corpo de prova Charpy tipo A (Figura 07).

Levando em consideração que neste ensaio, os resultados obtidos com vários corpos de prova de um mesmo metal são bastante diversos. Para chegar a conclusões confiáveis a respeito do material ensaiado, foram utilizados cinco corpos de prova para cada uma das quatro ligas analisadas (Figura 13).

Figura 13 – Corpos de Prova utilizados.



Fonte: Autor, 2013.

A máquina de ensaio (figura 14) utilizada foi um máquina de impacto modelo JB-300B, fabricada pela empresa JINAN SHIDAI SHIJIN INSTRUMENT CO., LTD, utilizando o *SMAL PENDULUN* com capacidade de medição de até 150 J, variação de 1 J e espaçamento de 40mm na ferramenta de fixação dos corpos de prova.

Figura 14 – Máquina de ensaio utilizada.



Fonte: Autor, 2013.

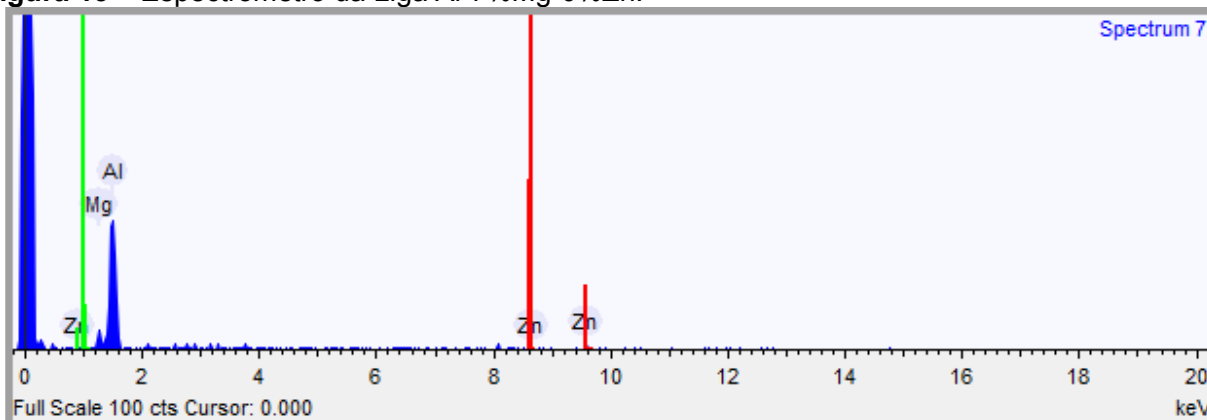
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE QUÍMICA

A análise química da liga Al-7%Mg com variação do percentual de zinco, foi coletada por meio de EDX nas amostras retiradas de todos lingotes.

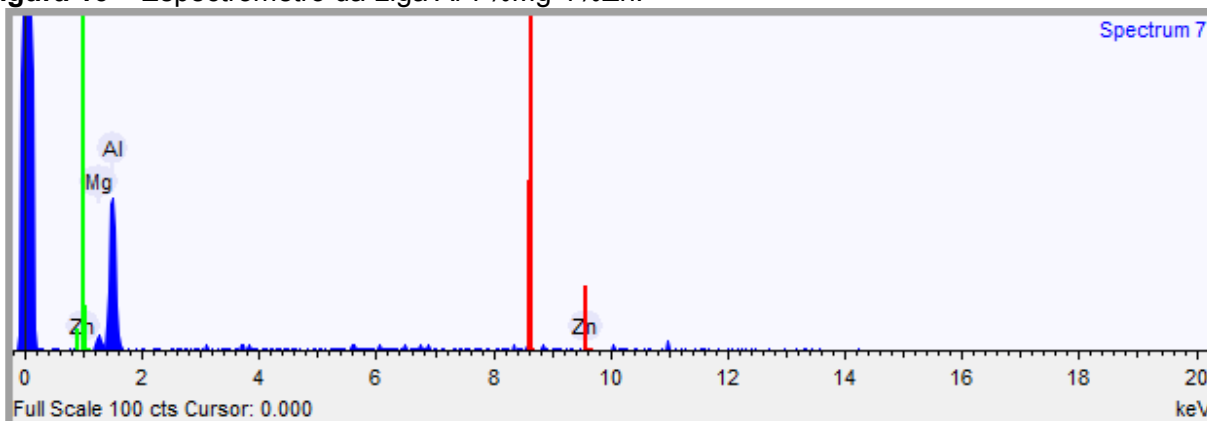
A análise foi realizada em amostras retiradas de diferentes pontos de cada lingote, a partir de então analisadas. Obtida como composição geral a já esperada no início da análise, Al-7%Mg, Al-7%Mg-1%Zn, Al-7%Mg-2%Zn e Al-7%Mg-3%Zn, conforme figuras 15 a 22.

Figura 15 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-0%Zn.



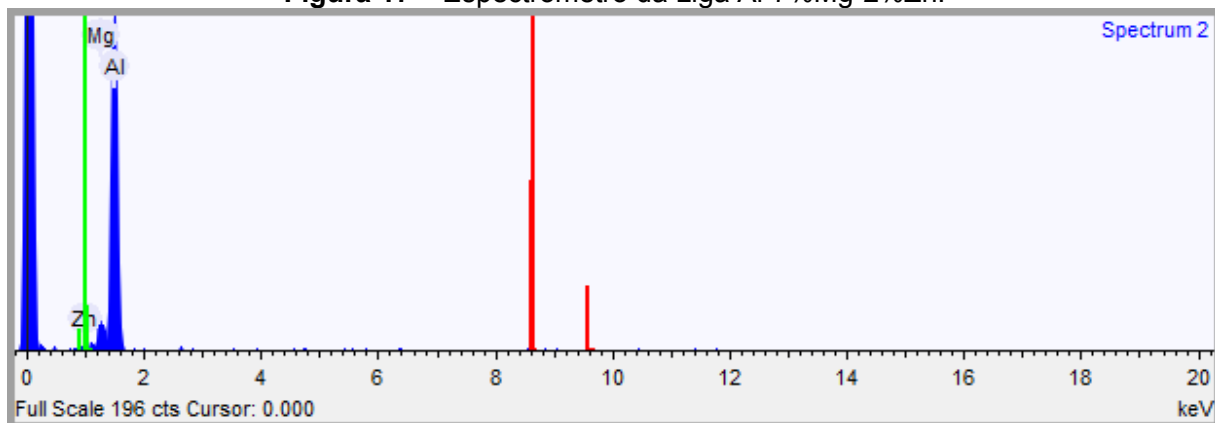
Fonte: Autor, 2012.

Figura 16 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-1%Zn.



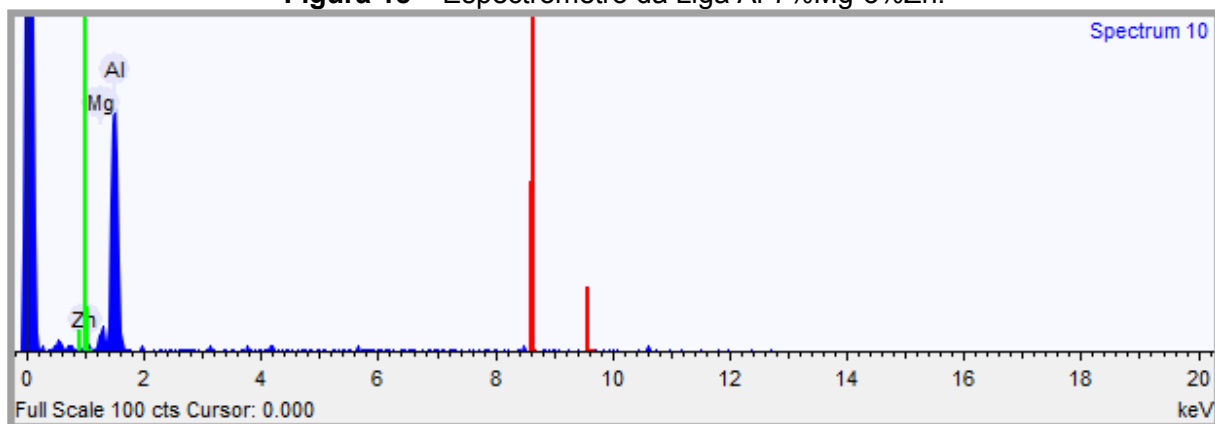
Fonte: Autor, 2012.

Figura 17 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-2%Zn.



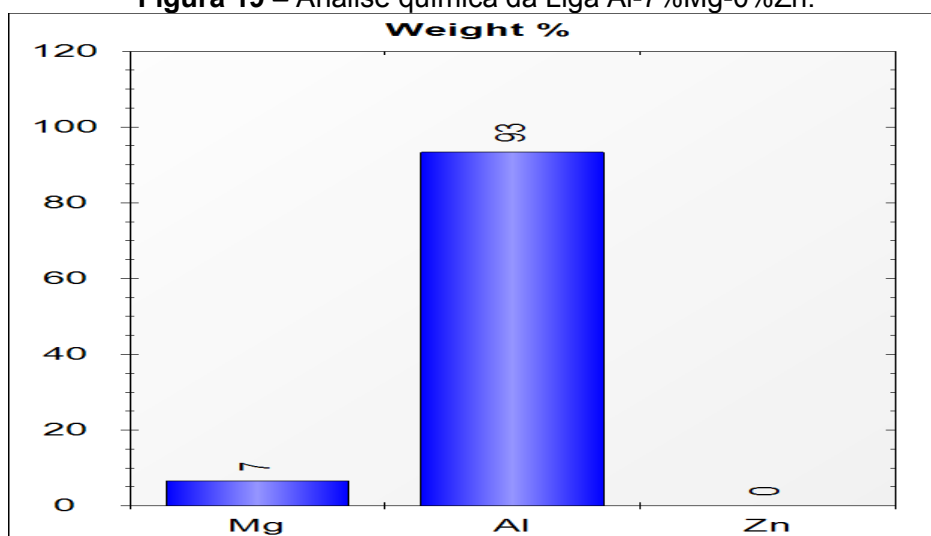
Fonte: Autor, 2012.

Figura 18 – Espectrômetro da Liga Al-7%Mg-3%Zn.

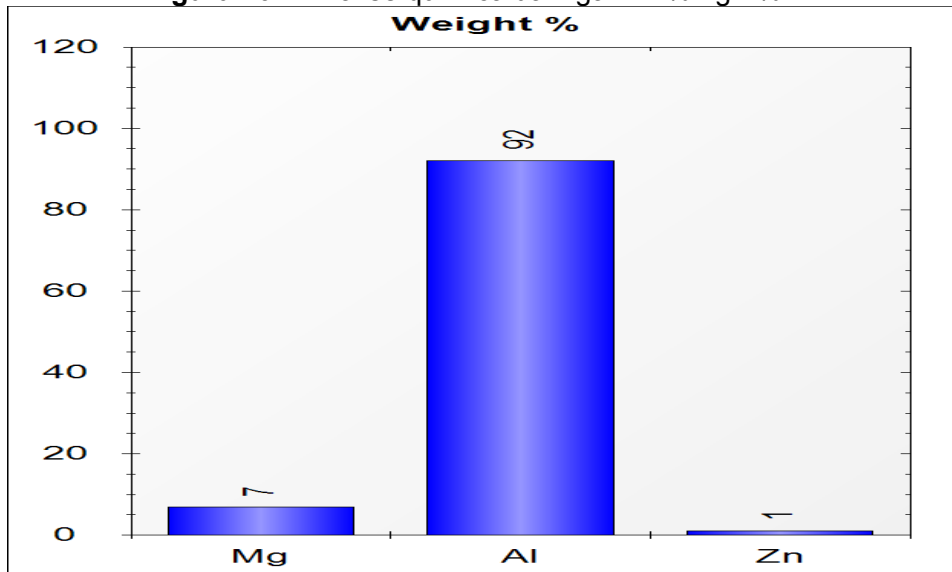


Fonte: Autor, 2012.

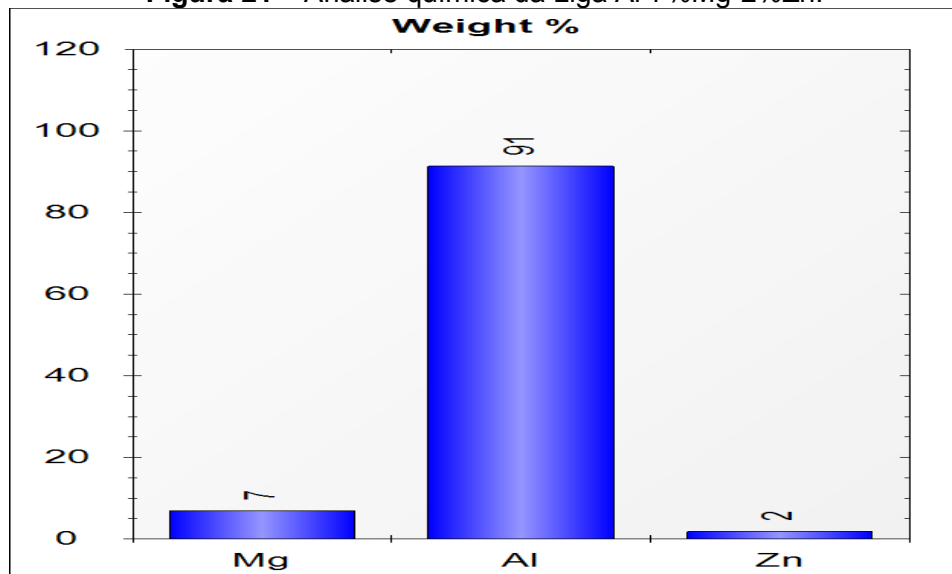
Figura 19 – Análise química da Liga Al-7%Mg-0%Zn.



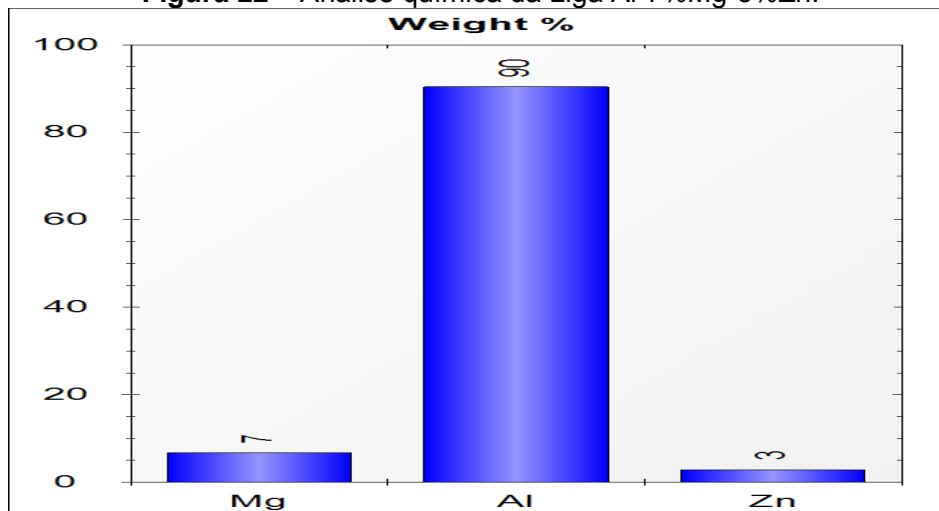
Fonte: Autor, 2012.

Figura 20 – Análise química da Liga Al-7%Mg-1%Zn.

Fonte: Autor, 2012.

Figura 21 – Análise química da Liga Al-7%Mg-2%Zn.

Fonte: Autor, 2012.

Figura 22 – Análise química da Liga Al-7%Mg-3%Zn.

Fonte: Autor, 2012.

4.2. ANÁLISE MACROESTRUTURAL

4.2.1. MACROESTRUTURA DA LIGA

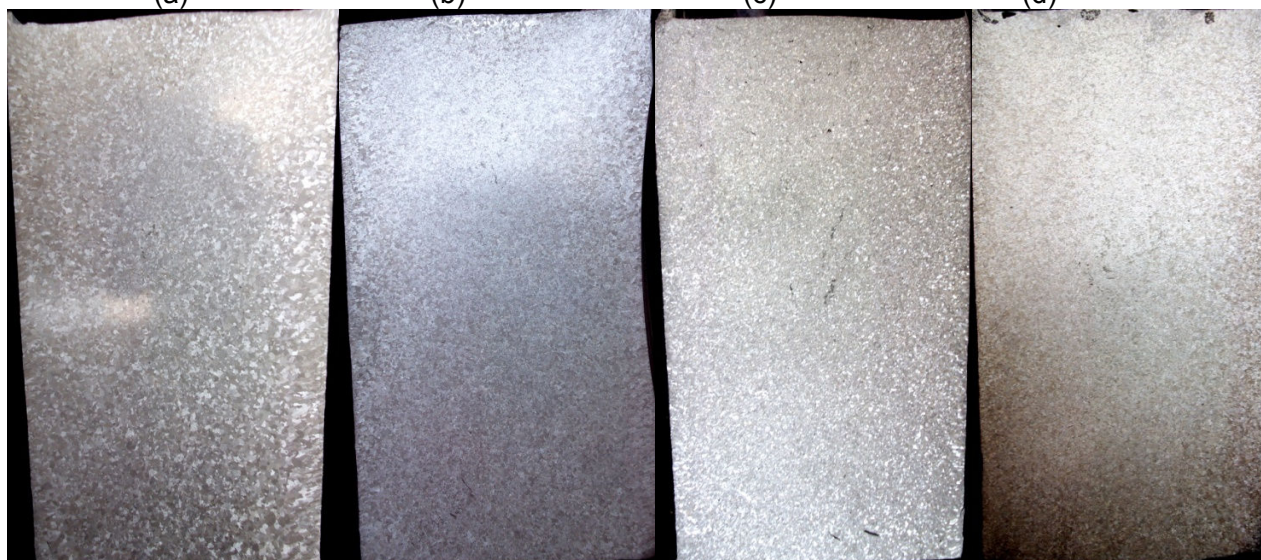
A liga Al-7%Mg com os diferentes percentuais de soluto zinco, apresentaram todas estruturas granular equiaxial refinada como estrutura predominante. Com o decorrer do aumento do percentual de zinco na liga, houve uma pequena variação quanto ao tamanho dos grãos das composições analisadas, isto possivelmente decorrente do aumento do potencial nucleante proporcional ao aumento do percentual de soluto na liga [11]. Todos os lingotes também apresentaram um pequeno percentual de zona coquilhada, não variando significativamente com o aumento do soluto zinco, como mostra a figura 23.

O percentual de zona coquilhada foi controlado possivelmente devido: o vazamento ser realizado com um superaquecimento considerável combinado a um aquecimento do molde o que formaria uma zona coquilhada pequena ou até inexistente [11]. As correntes convectivas formadas no vazamento aos 700°C ocasionariam também o desprendimento de grande parte dos grãos coquilhados formados e os refundiriam no interior da liga o que formaria apenas a pequena zona coquilhada, provenientes possivelmente do potencial nucleante do molde e de uma difusividade de calor maior que a do líquido [12].

A aplicação de pressão na liga provocou uma alta na taxa de transferência de calor diminuindo o tempo de solidificação o que no alumínio poderia se reduzir pela metade [3]. Assim, a solidificação ocorreu conservando a zona coquilhada formada dentro do intervalo de espera para pressurização (tempo entre o vazamento e aplicação de pressão).

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 [12]. Por fim, facilitando a formação dos grãos equiaxiais e impossibilitado o crescimento de qualquer zona colunar, figura 23.

Figura 23 –Macroestrutura da liga Al-7%Mg: (a) 0% Zn,(b) 1% Zn,(c) 2% Zn e (d)3% Zn.



Fonte: Autor, 2012.

4.2.2. DEFEITOS NA MACROESTRUTURA

Os lingotes apresentaram apenas a ocorrência de macrosegregação normal, decorrente de uma rápida velocidade de solidificação sofrida pela liga, possivelmente devido a excessiva pressão oferecida, ocasionando um aumento instantâneo do ponto de fusão, maior contato entre metal/molde e aumentando também a taxa de transferência de

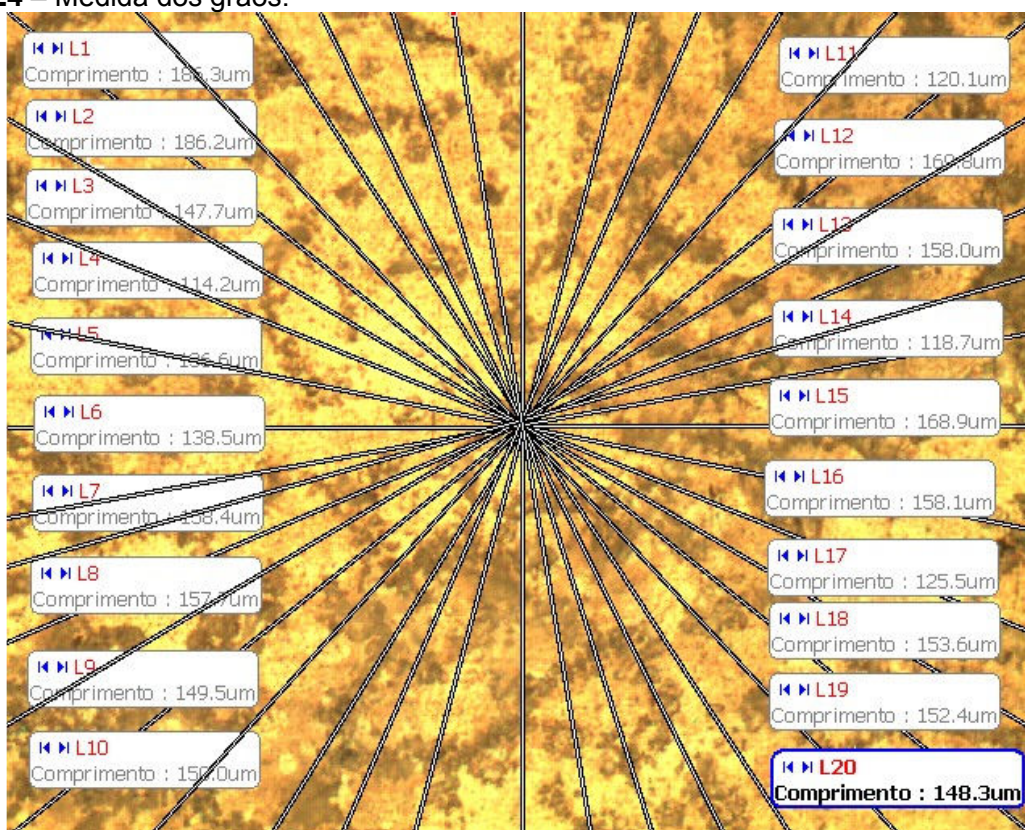
calor o que diminui intervalo de solidificação. Com maior velocidade na transformação líquido/sólido acaba em não possibilitar um possível deslocamento gravimétrico da segregação, figura 23.

Presença de defeitos como poros e defeitos de Shrinkage não foram encontrados na macroestrutura da liga.

4.2.3. TAMANHO MÉDIO DE GRÃO

Com uso da norma ASTM E 112/88 [13], foi possível a obtenção do tamanho médio de grãos para todos os distintos lingotes. Na prática metalográfica a medida do “tamanho de grãos”, vista suas irregularidades geométricas, geralmente refere-se a media de mensurações que se fazem necessárias de forma em que se possa obter um diâmetro aproximado do grão. De acordo com os procedimentos descritos na Norma, realizou-se 20 medidas para cada grão (Figura 24).

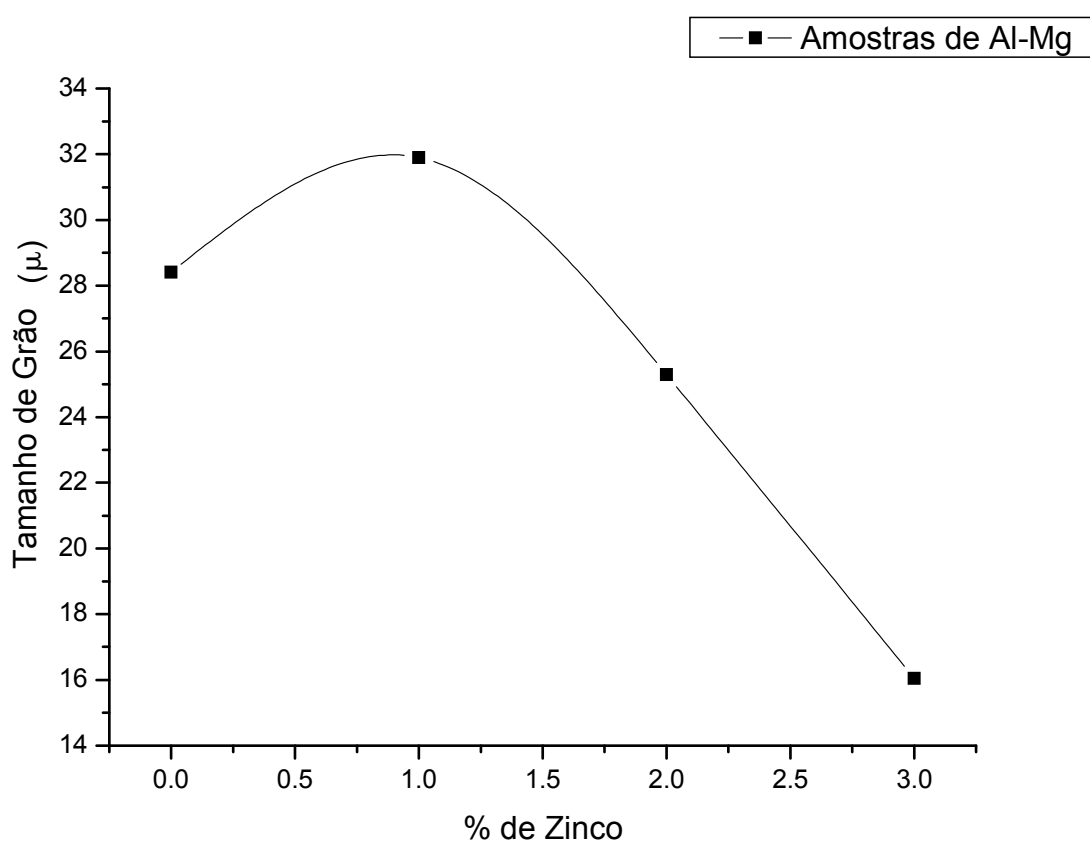
Figura 24 – Medida dos grãos.



Fonte: Autor, 2012.

Com o acréscimo do elemento zinco, houve certa diminuição do tamanho médio dos grãos conforme figura 25, isto possivelmente decorrente do aumento do potencial nucleante pela maior presença do volume de soluto na liga [14], crescendo com isso o número de núcleos formadores de grãos e maior percentual de grãos por volume de sólido na peça.

Figura 25 – Variação do tamanho médio dos grãos.



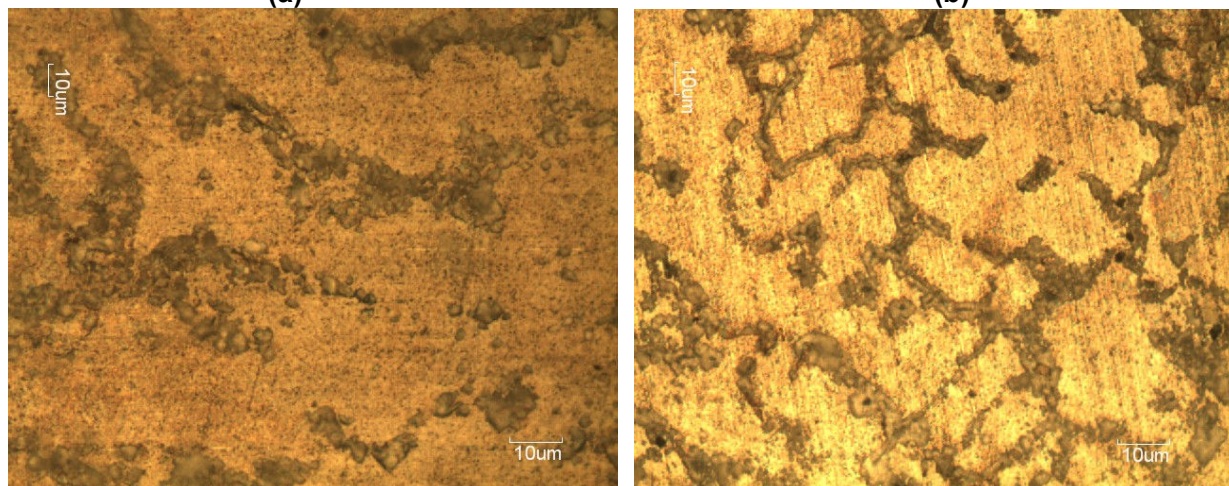
Fonte: Autor, 2013.

4.3. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Na análise microestrutural, os principais defeitos ocorreram possivelmente devido a forte tendência de oxidação das ligas de Alumínio - Magnésio, moderada tendência de defeitos de fundição, contração característica do alumínio e presença de fragmentos exógenos no sistema Fusão/Vazamento da liga [15].

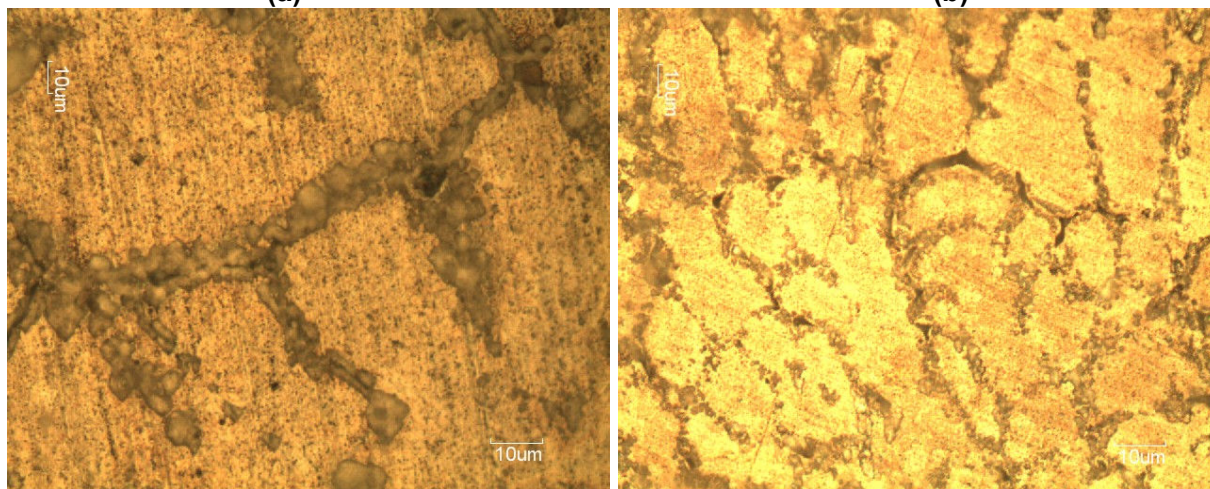
A microestrutura de todos lingotes apresentaram pequeno percentual de microsegregações como pode-se ver através das figuras 26 a 29 . Uma análise química foi realizada por meio do EDX e uma pequena variação percentual de elementos foi constatada, como mostra as Figuras 30 e 31, análise química resultante de uma media das variações percentuais de todas imagens analisadas.

Figura 26 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg (a)1000 X (b) 500X.
(a) (b)



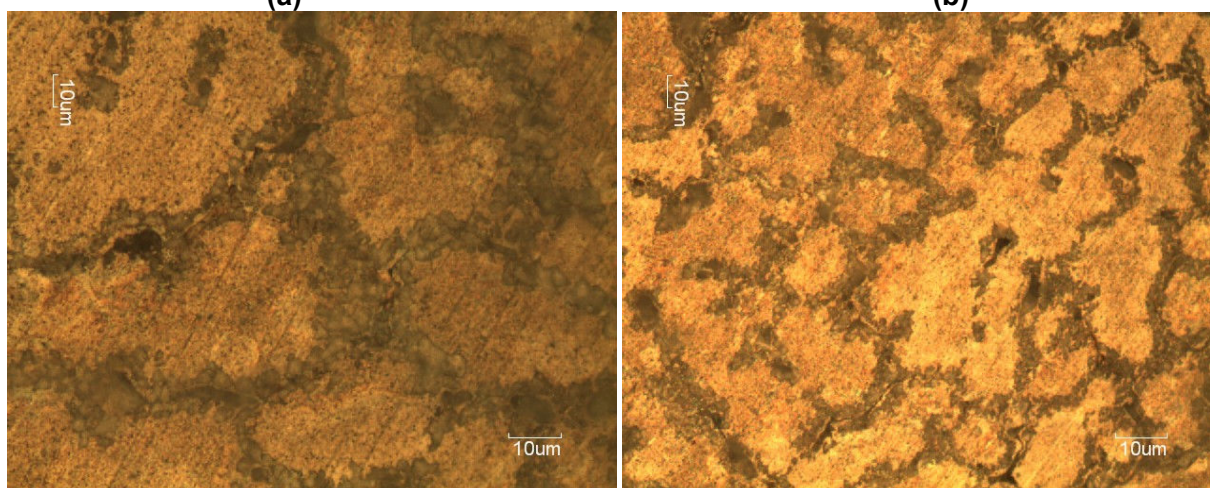
Fonte: Autor, 2012.

Figura 27 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg-1%Zn (a)1000 X (b) 500X.
(a) (b)



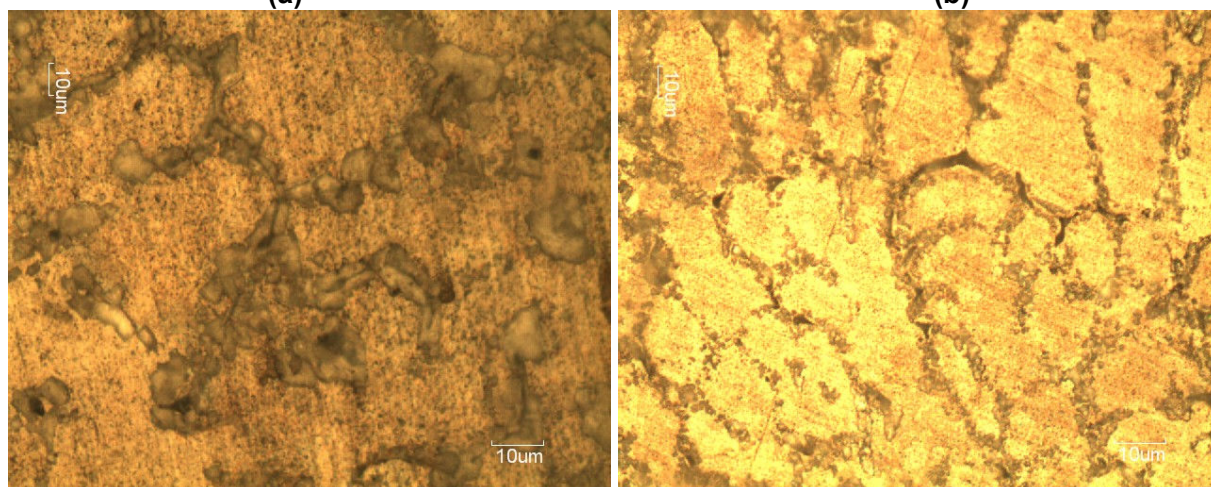
Fonte: Autor, 2012.

Figura 28 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg-2%Zn (a) 1000 X (b) 500 X.
(a) (b)



Fonte: Autor, 2012.

Figura 29 – Microestrutura da Liga Al-7%Mg-3%Zn (a)1000 X (b) 500X.

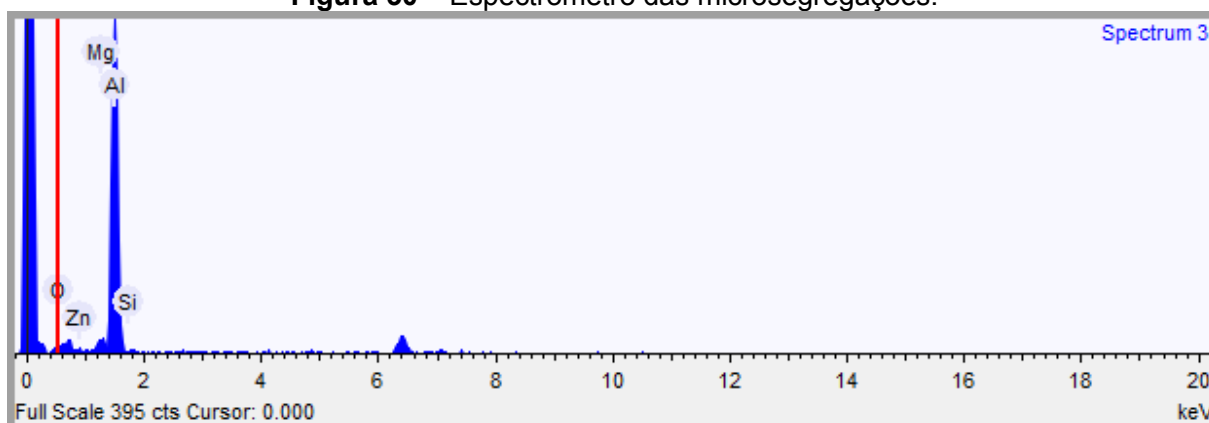


Fonte: Autor, 2012.

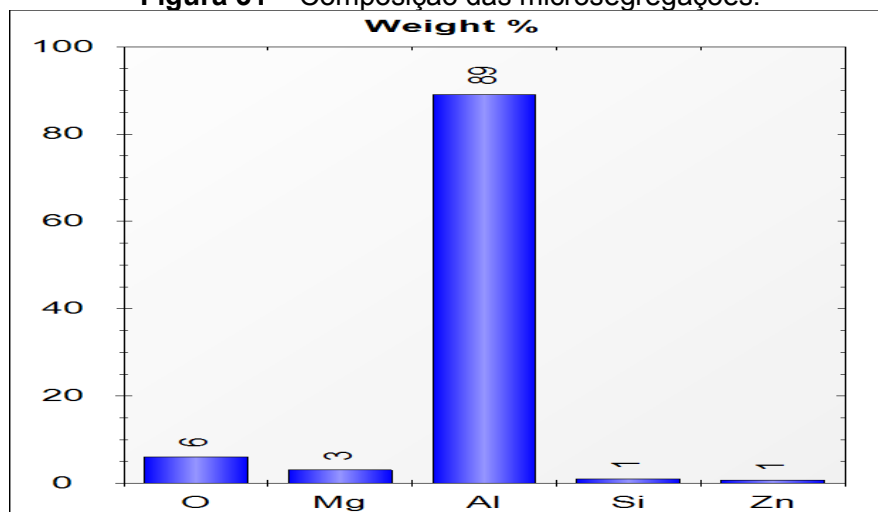
Este defeito quando em grandes percentuais causa impedimento do movimento das discordâncias e ocasiona assim fragilidade do metal em sua conformação e aumento da tendência de propagação de trincas no sofrimento de tensões.

Os elementos encontrados na microsegregações são provenientes de Oxigênio e 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 30 – 31) .

Figura 30 – Espectrômetro das microsegregações.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 31 – Composição das microsegregações.

Fonte: Autor, 2012.

Na observação dos grãos, constatou-se maior regularidade dos grãos da liga de Al-7%Mg-1%Zn como vemos na figura 27(a). Esta apresentando também o maior tamanho médio de grãos conforme a análise apresentada na figura 25.

Mesmo com a utilização do método de solidificação de *squeeze casting*, micro porosidades foram encontradas em todas as amostras como pode-se notar nas figuras 26 (a), 27 (a), 28 (a) e 29 (a). Isto possivelmente vindo a afetar na maior fragilidade das amostras por serem acumuladores de tensão e elevarem a tendência de propagação de trincas da liga.

Esta presença de microporosidades veio 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.

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.

4.4. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Na análise de resistência ao impacto, todos os corpos de prova apresentaram fratura frágil.

Os resultados apresentaram pequenas variações de Energia Absorvida. Abaixo segue a tabela 01 com os resultados obtidos para cada amostra.

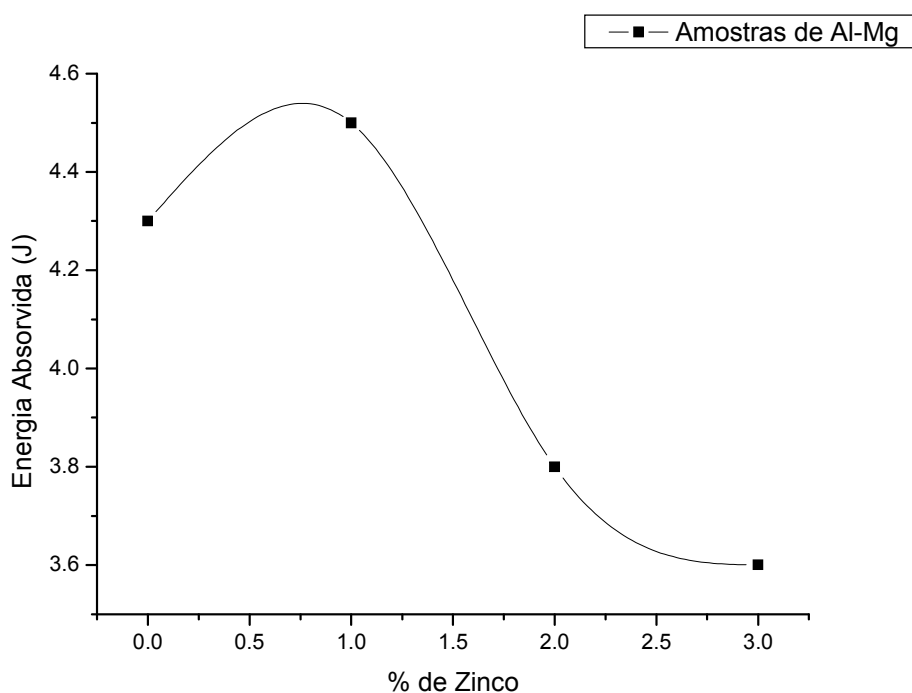
Tabela 01 – Resultado do ensaio de impacto (Energia Absorvida – Joule (J)).

Corpo de Prova / N° do Ensaio	Al-7%Mg	Al-7%Mg-1%Zn	Al-7%Mg-2%Zn	Al-7%Mg-3%Zn
1	X	4,1	3,4	3,3
2	4,5	X	4	3,5
3	4,8	4,1	3,9	3,3
4	4	4,9	X	3,9
5	4	4,9	X	4,1
Média	4,3	4,5	3,8	3,6

Fonte: Autor, 2013.

A figura 32 representa melhor os resultados obtidos para o ensaio de impacto. Revendo a macroestrutura e o tamanho dos grãos encontrados, entende-se esta variação de resultados conforme o que já era o esperado. O maior tamanho médio dos grãos da liga com 1% de zinco tem maior absorção de energia devido ao seu menor volume de discordâncias.

Figura 32 – Resultado do ensaio de impacto.



Fonte: Autor, 2013.

Todos os corpos de prova das ligas analisadas foram ensaiados apresentando característica de fratura frágil, apenas um pequeno percentual de zona com característica dúctil no centro da fratura foi verificado, figura 33.

Figura 33 – Fratura dos corpos de prova.



Fonte: Autor, 2013.

5. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos e a correlação entre os aspectos morfológicos estruturais, distribuição de soluto, parâmetros de resistência a impacto e Microestrutura das ligas estudadas permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

5.1. ANÁLISE MACROESTRUTURAL

A aplicação da pressão de 80 Mpa na solidificação da liga refletiu na redução de defeitos e refinamento das estruturas para todas as composições estudadas, isso resultou na eliminação dos defeitos de fundição, tais como: rechupe, macrossegregação, defeitos de Shrinkage e porosidades.

Observou-se, nas ligas, estruturas preferencialmente equiaxiais tendo uma mudança significativa na redução do tamanho médio de grãos quando elevado os valores do teor de soluto Zn a valores acima de 1%. Isso proporcionou a redução da tenacidade a fratura das ligas Al-7%Mg-2%Zn e Al-7%Mg-3%Zn.

5.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Observou-se a presença de microsegregações e microporos, 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 somada a contração característica do alumínio, o que proporciona o maior surgimento de micro defeitos de fundição.

5.3. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Os resultados apresentaram preferencialmente fratura com característica frágil.

A liga de maior tenacidade foi a de Al-7%Mg-1%Zn, este que igualmente apresentou maior tamanho dos grãos. Resultado este proveniente do menor volume de discordâncias por maior tamanho médio de grãos, o que acaba possibilitando maior absorção de energia.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Estudar a variação mecânica de resistência a tração e impacto da liga Al-7%Mg-1%Zn quando obtida através do método *Squeeze Casting* por diferentes pressões;
- Estudar o efeito morfológico estrutural da liga Al-7%Mg-1%Zn quando obtida por diferentes métodos de fundição;
- Estudar o comportamento dendritico da liga Al-7%Mg-1%Zn quando solidificada com uso do método *squeeze casting* por diferentes pressões;
- Analisar a fratura da liga Al-7%Mg-1%Zn quando solidificada com uso do método *squeeze casting* por diferentes pressões.

6. REFERENCIAS

- [1] 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.
- [2] Ferreira, J. M. G. de C., **Tecnologia da Fundição**, Fundação CalousteGulbenkian, pp. 507-518, 1999.
- [3] Hu, H., **Squeeze Casting of Magnesium Alloys and their Composites**, J. Mater. Sci. 33, pp. 1579-1589, 1998.
- [4] 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.
- [5] **ALUMINIO E SUAS LIGAS**, Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aluminio%5B1%5D.pdf>>; 2013 [acessado em janeiro de 2012].
- [6] Alcan, **Manual de Soldagem**, Alcan Alumínio do Brasil S/A, vol 1, pp.13-17, 2001.
- [7] BRITO, C. C.. **Influência da Pressão na Modificação Estrutural e Propriedades Mecânicas da liga Al-7%Mg Obtida Através do Processo Squeeze Casting**. Marabá-Pa, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2009. 67 p.
- [8] ASTM Standard E 23-94a - **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 1994.
- [9] Callister, Jr., Willian D., **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais : uma abordagem integrada** / Willian D. Callister, Jr.- Rio de Janeiro : LTC, 2^aedição, pp. 95-99, 2006.
- [10] BRITO, C. C.; MAGALHÃES, F. D. ; Costa, A. M. ; Siqueira, C.A*. . **Microstructural Analysis and Tensile Properties of Squeeze Cast Al-7%Mg Alloy**. materials science forum, 2010.
- [11] Garcia, A., **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**, 1^a edição, Brasil, Ed. UNICAMP, Campinas, 2001.
- [12] MULLER, Arno. **Solidificação e Análise dos Metais**. Editora da UFRGS, Porto Alegre, RS.2002.
- [13] ASTM Standard E 112 – 88a - **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. American Society for Testing and Materials, 1988.
- [14] CRUZ, K. A. S.¹; Cheung, N.²;Garcia, A.³. **Parâmetros térmicos, macroestrutura e microestrutura na solidificação direcional da liga Al-20%Sn**. Congresso Anual da ABM - Internacional, 62. Vitória, ES. 2007.

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