

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Departamento de Metalurgia

CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DA LIGA DE MAGNÉSIO AZ61
DEFORMADA A QUENTE

Kíssia Carolina Bertoluci Cardoso

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Ing. Lício Schaeffer

Porto Alegre
2019

CIP - Catalogação na Publicação

Cardoso, Kíssia Carolina Bertoluci
CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DA LIGA DE MAGNÉSIO AZ61
DEFORMADA A QUENTE / Kíssia Carolina Bertoluci
Cardoso. -- 2019.
48 f.
Orientador: Lírio Schaeffer.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Liga de magnésio. 2. Conformação mecânica. 3.
Caracterização metalúrgica. 4. AZ61. 5. Deformação a
quente. I. Schaeffer, Lírio, orient. II. Título.

Relembre porque começou...

AGRADECIMENTOS

O sonho em ser engenheira da UFRGS nasceu em 2009 e se concretiza no presente ano.

Agradeço aos meus pais, Susana e Marco, pelo suporte incansável nessa trajetória. Essa conquista é nossa!

A minha irmã por me motivar a te orgulhar.

Aos meus tios e nonos por me apoiarem e acreditarem no meu potencial.

Ao meu namorado, Rodrigo, por todo o ensinamento e suporte.

Aos meus amigos por toda compreensão nos momentos de ausência. Sem vocês nada disso teria se tornado realidade.

Ao meu orientador, Prof. Lício pela orientação ao longo desse trabalho. Ao doutorando Jerry por dividir conhecimento.

Aos meus colegas de curso, em especial, Aline, Ana Carolina, André e Vanessa por todo auxílio prestado.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino de qualidade. Levarei para sempre o orgulho de ser “filha” da UFRGS.

Por fim, obrigada a todos que tornaram essa vitória possível.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA	2
2.1 Magnésio na Indústria	2
2.2 Magnésio	2
2.3 Ligas de magnésio	4
2.3.1 Descrição	4
2.3.2 Adição de elementos de liga	4
2.3.3 Classificação das ligas de magnésio	6
2.3.4 Cristalografia das ligas de magnésio	8
2.3.5 Aspectos da deformação das ligas de magnésio	8
2.4 Ligas de magnésio – alumínio – zinco	10
2.5 Liga AZ61.....	11
2.6 Aspectos metalúrgicos da deformação a quente	13
2.6.1 Encruamento.....	14
2.6.2 Recuperação dinâmica	14
2.6.3 Recristalização dinâmica	15
2.7 Deformação a quente das ligas de magnésio	15
2.8 Curva de escoamento	16
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 Materiais	18
3.2 Metodologia	19
3.2.1 Caracterização microestrutural	20

3.2.2	Dureza Brinell	20
3.3	Condições de ensaio	21
3.3.1	Temperatura	22
3.3.2	Velocidade de deformação	22
3.3.3	Projeto das matrizes	23
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	Curva de escoamento da liga de magnésio AZ61	26
4.2	Composição química	27
4.3	Dureza	28
4.4	Avaliação microestrutural	29
5.0	CONCLUSÕES.....	33
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	34
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de fases do sistema Mg-Al	5
Figura 2.2	Diagrama de fases do sistema Mg-Zn	6
Figura 2.3	Estrutura hexagonal compacta do magnésio	8
Figura 2.4	Curva de escoamento em compressão da liga AZ61A com (a) $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$ e (b) $\dot{\phi} = 10 \text{ s}^{-1}$	10
Figura 2.5	Diagrama ternário de magnésio, alumínio e zinco em fração molar e suas respectivas ligas comerciais à 300 °C	12
Figura 2.6	Curva esquemática da tensão deformação e a ocorrência de encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica	14
Figura 2.7	(a) Microestrutura inicial; (b) microestrutura após uma deformação; (c) microestrutura após segunda deformação	15
Figura 2.8	Curva de escoamento esquemática	17
Figura 2.9	Comportamento do corpo de prova antes e após o ensaio de compressão para obtenção da curva de escoamento	17
Figura 3.1	Fluxograma sobre as etapas realizadas no presente trabalho	19
Figura 3.2	Desenho técnico da liga de magnésio AZ61, com diâmetro $d_0 = 24 \text{ mm}$ e $h_0 = 8$ e 15 mm	20
Figura 3.3	(a) Estrutura de matriz superior e inferior, corpo de prova e batente; (b) estrutura “copo quente”	21
Figura 3.4	Prensa hidráulica modelo PLL40	23
Figura 3.5	Representação esquemática do ferramental para os ensaios	24
Figura 4.1	Curva de escoamento a 350 °C da liga de magnésio AZ61 com velocidade de deformação entre 2 e 5 s^{-1}	26
Figura 4.2	Curva de escoamento a 350 °C da liga de magnésio AZ61 com velocidade de deformação entre 2 e 5 s^{-1} em comparada com a curva KAINER em preto com velocidade de deformação de 5 s^{-1}	27
Figura 4.3	Impressão na superfície das amostras	28
Figura 4.4	Microestrutura da liga de magnésio AZ61 na condição inicial	30
Figura 4.5	Microestrutura da liga de magnésio AZ61 após alívio de tensões	30

Figura 4.6	Microestrutura da liga de magnésio AZ61 deformada 40% em evidência as linhas de fluxo	31
Figura 4.7	Microestrutura da liga de magnésio AZ61 deformada 40%	32
Figura 4.8	Microestrutura da liga de magnésio AZ61 deformada 60%	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Propriedades físicas do Magnésio puro com 99,9% em massa	3
Tabela 2.2	Comparação de propriedades de ligas de magnésio, liga de alumínio e aço	4
Tabela 2.3	Nomenclatura dos elementos e tratamentos termomecânicos	7
Tabela 2.4	Faixas de temperaturas recomendadas para o forjamento de ligas de magnésio	9
Tabela 2.5	Composição química padrão segundo norma UNS M11610 da liga AZ61	11
Tabela 2.6	Propriedades mecânicas da liga AZ61A-F	13
Tabela 3.1	Composição química da liga AZ61 em % de massa	18
Tabela 3.2	Esquema de roteiro de aquecimento	22
Tabela 3.3	Relação da deformação e da altura do batente	25
Tabela 4.1	Resultados da análise de composição química em % de massa	28
Tabela 4.2	Valores de dureza Brinell	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$MgCO_3$	Magnesita
$CaMg(CO_3)_2$	Dolomita
HC	Hexagonal compacta
$\dot{\phi}$	Velocidade de deformação (s^{-1})
φ	Deformação verdadeira (-)
α	Magnésio em solução sólida
γ	$Mg_{17}Al_{12}$
δ	Alongamento (%)
ρ	Densidade (g/cm^3)
Rm	Resistência a tração (MPa)
$V_{prensagem}$	Velocidade de prensagem (mm/s)
h_0	Altura final
d_0	Diâmetro
k_f	Tensão de escoamento (MPa)
WC	Carboneto de tungstênio
H13	Aço ferramenta AISI H13
HB	Dureza Brinell (kgf/mm^2)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer

RESUMO

A fim de reforçar a importância de estudos de utilização de ligas de magnésio em processos de transformação mecânica, o presente trabalho visa caracterizar metalurgicamente a liga de magnésio AZ61 deformada em 40 e 60% em relação à altura inicial. Além disso, demonstra-se importante avaliar a resistência mecânica à compressão do processo de deformação a quente, à temperatura de 350 °C. As análises de composição química, de dureza e de microestrutura foram realizadas para caracterização inicial da amostra. As amostras foram aquecidas até a temperatura de trabalho e deformadas. O ensaio de compressão contou com um dispositivo denominado “copo quente” para garantir a manutenção da temperatura durante o ensaio. As amostras deformadas foram caracterizadas por meio da dureza e da microestrutura. Em ambos os casos, ocorreu o incremento da dureza e refinamento da microestrutura. Para o nível de deformação e para a ferramenta utilizada não houve ruptura das amostras, demonstrando a excelente deformabilidade da liga AZ61.

ABSTRACT

In order to increase the importance of magnesium alloys studies in mechanical forming processes, the present study aims to characterize the magnesium alloy AZ61 deformed in 40% and 60%, regarding the initial, by comparing microstructure and hardness. Besides that, it is important to evaluate the mechanical compression resistance to hot forming process, at 350°C. Chemical composition analysis, hardness test and microstructure analysis were performed with the purpose of knowing the initial condition of the sample. After that, the samples were heated to the work temperature and deformed. The compression test was done with the help of a device named “hot cup” in order to guarantee the temperature stability during the test . The deformed samples were evaluated by hardness and microstructure analysis and, in both cases, a hardness increase and a microstructure refinement occurred. Considering the deformation level and the tool used, it can be concluded that the AZ61 alloy has excellent deformability, since none of the samples collapsed.

1.0 INTRODUÇÃO

O crescente investimento em pesquisas para redução de peso em componentes do setor automobilístico é justificado ao desafio de relacionar resistência mecânica a componentes leves. Com isso, diversas ligas de magnésio têm sido estudadas, devido a sua baixa densidade e excelentes propriedades mecânicas.

Parcela significativa das peças produzidas a partir de ligas de magnésio são provenientes do processo de fundição. Contudo, tal processamento representa perda de resistência mecânica ao comparar aos processos de transformação mecânica. Através disso, se faz necessário o estudo sobre a deformação mecânica das ligas de magnésio com o objetivo de encontrar a condição ideal de transformação mecânica.

A fim de explorar as condições de deformação a quente das ligas de magnésio, o presente trabalho visa a caracterização da liga de magnésio AZ61 utilizada em processos de deformação a quente.

O objetivo desse trabalho é analisar duas condições de deformação, 40% e 60% em relação à altura, à 350 °C por meio da dureza e da microestrutura. Além disso, os objetivos específicos são:

- Determinar a condição de trabalho a quente;
- Realizar a construção da curva de escoamento por meio de compressão a quente;
- Determinar a composição química da liga AZ61;
- Avaliar a dureza Brinell e a microestrutura nas duas deformações em estudo.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Magnésio na Indústria

A utilização de materiais estruturais leves ganhou espaço devido a estratégia energética do setor automobilístico, visando diminuir o consumo de combustíveis e aumentar a capacidade de transporte. Tal aplicação é justificada devido às características mecânicas satisfatórias combinadas a baixas densidades, atribuindo resistência mecânica a componentes leves (MORDIKE et al., 2001).

Dentro desse contexto, o magnésio (Mg) é o metal mais leve utilizado em aplicações estruturais, devido ao baixo peso e a elevada resistência mecânica. Diversas companhias automobilísticas têm utilizado ligas de magnésio em componentes como: painéis de instrumentos, caixa de transferência e componentes de direção (LUO, 2012).

Nas duas últimas décadas, a viabilidade econômica na utilização de ligas de magnésio ocorreu devido ao aumento da demanda e a diminuição de custos de obtenção da matéria-prima (GUPTA, 2011).

2.2 Magnésio

O magnésio é um metal estrutural leve sendo amplamente utilizado em componentes de ligas leves na indústria, seja na área automotiva e/ou aeroespacial, devido à sua baixa densidade. Corresponde ao elemento da tabela periódica com símbolo químico Mg e número atômico igual a 12. O magnésio pertence ao grupo 2 da tabela periódica, sendo assim, sua classificação é de metal alcalino-terroso. Apresenta coloração cinza em seu estado natural e ponto de fusão em torno de 650 °C. Sua estrutura cristalina é hexagonal compacta (KLEINER, 2004).

É o 8º elemento mais abundante na natureza, representando em torno de 2,5% da crosta terrestre. Não é possível encontrar na forma livre; no entanto, é possível encontrar na composição de mais de 60 minerais rochosos, sendo os principais a

Magnesita $MgCO_3$ e a Dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). É encontrado também dissolvido na água do mar, leitos salinos e águas salinas subterrâneas (DAVIES, 2003).

Com isso, o principal método para obtenção do magnésio puro é através do processo eletrolítico. A extração de magnésio ocorre pela eletrólise do cloreto de magnésio, utilizando como matéria-prima magnesita, dolomita ou águas salinas naturais. A proporção de produção/matéria-prima é de: para cada tonelada de magnésio produzido são necessárias oitocentas toneladas de água do mar (PEIXOTO, 2000). Além do método tradicional, é possível reciclar o magnésio reduzindo consideravelmente os custos de extração e produção deste material.

Na Tabela 2.1, são apresentadas as principais características do magnésio entre as quais, já mencionada, a sua baixa densidade. Essa propriedade associada à abundância do material e baixo custo tornam o magnésio atrativo para aplicações que requerem baixo peso.

Tabela 2.1 Propriedades físicas do Magnésio puro com 99,9% em massa.

Propriedade	Valor
Coloração	Cinza prateado
Densidade (Temperatura ambiente)	1,738 g/cm ³
Temperatura de fusão	650 °C ± 5 °C
Estrutura cristalina	HCP
Calor de fusão	370 ± 15 kJ/kg
Coefficiente de expansão linear	26 x 10 ⁻⁸ K ⁻¹
Contração (sólido-líquido)	4,2%
Capacidade calorífica (a 20 °C)	1,05 kJ.(kg.K) ⁻¹
Condutividade térmica (a 20 °C)	155 W.km ⁻¹
Módulo de elasticidade	45 GPa
Limite de escoamento	90 a 105 MPa
Limite de resistência	160 a 195 MPa
Energia de defeito de empilhamento (a 25 °C)	125 mJ/m ²

Fonte: KLEINER, 2004.

O magnésio puro não é utilizado como material estrutural devido a seu baixo limite elástico em compressão e tração. Para a utilização do magnésio de forma estrutural, é necessário combinar com outros metais que possibilitam a formação de mecanismos de endurecimento para aumento de resistência (GRUPTA, 2011).

2.3 Ligas de Magnésio

2.3.1 Descrição

A baixa densidade, da ordem de $1,738 \text{ g/cm}^3$, valor que é, aproximadamente, 35% menor que do alumínio ($2,73 \text{ g/cm}^3$) e 80% menor que do aço (ERICKSON, 1990). Assim, a baixa densidade proporciona elevada razão entre a resistência mecânica e o peso (massa), quando comparada as ligas de alumínio e ao aço, como apresentado na tabela 2.2 (ASM METALS HANDBOOK, 1992).

Tabela 2.2 Comparação de propriedades de ligas de magnésio, liga de alumínio e aço.

Material	Nome	Rm (MPa)	ρ (g/cm^3)	δ (%)	k_f (MPa)
Ligas de magnésio	AZ91	280	1,82	8	154
	AM60	270	1,79	15	151
	AZ31B	220	1,78	10	124
Liga de alumínio	389	315	2,70	3	117
Aço	Aço carbono	517	7,86	22	66

FONTE: ASM METALS HANDBOOK, 1992.

2.3.2 Adição de elementos de liga

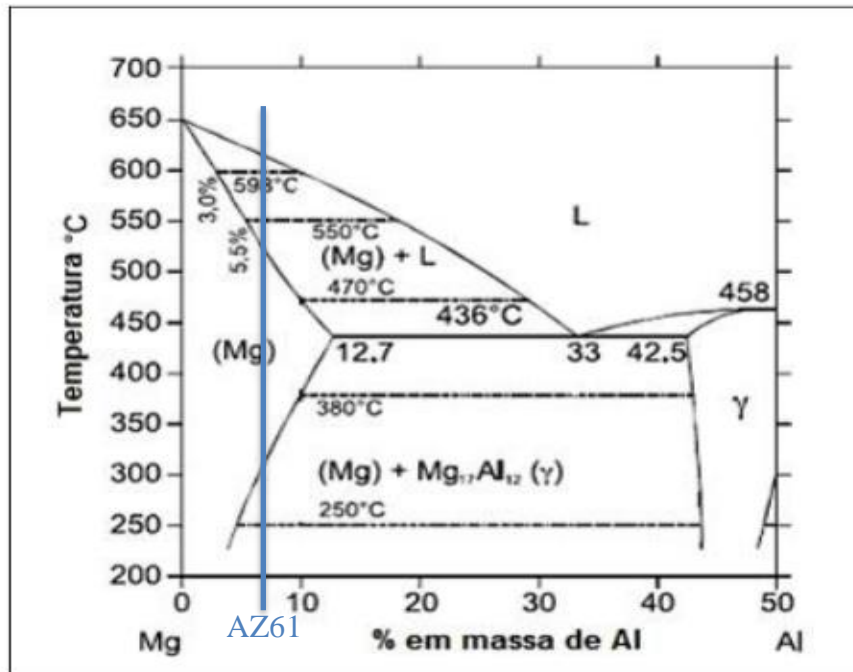
A adição de elementos de liga visa melhorar principalmente a elasticidade, o limite de escoamento e de resistência e a dureza. É importante ressaltar, que tais ligas são as mais leves entre todos os materiais estruturais devido à baixa densidade.

Para melhorar significativamente as propriedades mecânicas é necessário adicionar alguns elementos de liga, como o alumínio, berílio, lítio, terras raras e zinco, entre outros. Em alguns casos, os elementos de liga podem promover endurecimento por solução sólida ou por precipitação (BROOKS, 1982).

O principal elemento de liga utilizado é o alumínio. Tem a função de aumentar a resistência à tração e a dureza. No entanto, devido a precipitação da fase $Mg_{17}Al_{12}$

(γ) em contornos de grão, pode ocasionar a baixa resistência à elevadas temperaturas. Na figura 2.1, é apresentado o diagrama de fases do sistema Mg-Al.

Figura 2.1 Diagrama de fases do sistema Mg-Al (FRIEDRICK, 2006).

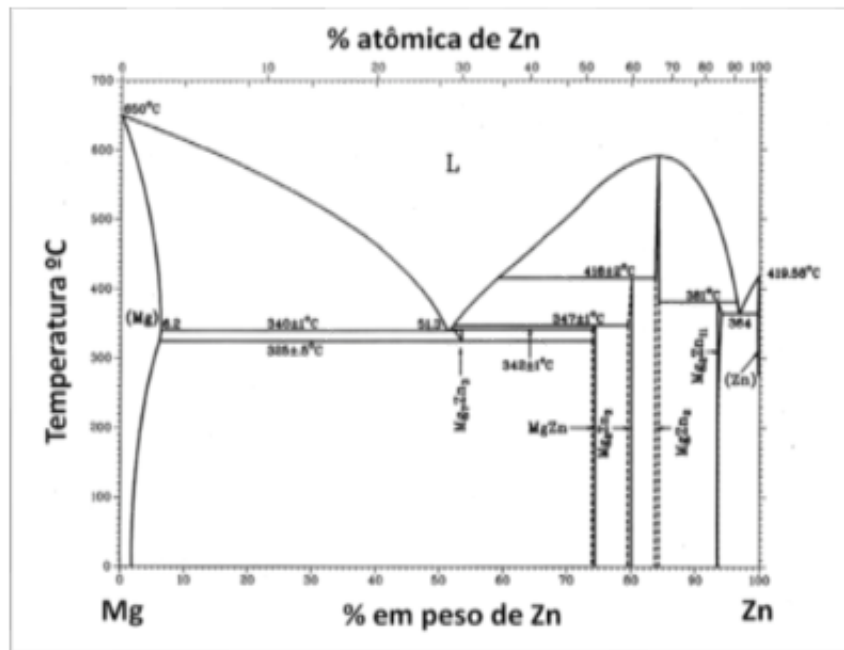


Fonte: FRIEDRICK, 2006.

Para a maioria das ligas de magnésio comerciais, é possível identificar através do diagrama de fases do sistema Mg-Al, a formação de precipitados $Mg_{17}Al_{12}$ é realizada, aproximadamente, entre 200 e 350 °C, podendo acarretar em endurecimentos na liga. Para completa solubilização dessa fase intermetálica, é necessário tratamento térmico prolongado em temperatura superior a 400 °C, com atmosfera protetora e combinados com rápidos resfriamentos (HOUSH, 1990).

O segundo elemento mais utilizado é o zinco, pois aumenta a resistência mecânica em temperatura ambiente. Para conferir tal aumento de resistência, é usualmente adicionado em conjunto ao alumínio; contudo, se adicionado em teores acima de 1% em massa, reduz a ductilidade a quente nas ligas que contém entre 7 a 10% de alumínio em massa. Além disso, ajuda a reduzir os efeitos deletérios do ferro e do níquel. (GARCIA, 2009). A figura 2.2 apresenta o diagrama de fases do sistema Mg-Zn.

Figura 2.2 Diagrama de fases do sistema Mg-Zn.



Fonte: ASM METALS HANDBOOK, 1992.

Conforme apresentado no diagrama binário Mg-Zn, a solubilidade do zinco no magnésio é máxima e igual a 6,2% em massa à 340 °C e diminui gradativamente com variação da temperatura, assim, na temperatura ambiente, a solubilidade máxima é de 1,8% em massa. A sua melhora na resistência mecânica em temperatura ambiente se dá ao aplicar o endurecimento por precipitação, pois há o controle através do tratamento térmico da decomposição da solução sólida supersaturada de zinco (FRIEDRICH 2006, GRUPTA 2011 e GARCIA 2009).

2.3.3 Classificação das ligas de magnésio

As ligas de magnésio podem ser divididas em duas categorias: em conformadas mecanicamente e fundidas. As ligas conformadas mecanicamente encontram-se na forma de extrudados, laminados, trefilados e forjados. As ligas fundidas apresentam diferentes formatos com excelente acabamento superficial. (LI, 2006).

Para as ligas de metais não ferrosos, a nomenclatura utilizada é a definida pela ASTM (American Society for Testing and Materials). As ligas de magnésio segundo a ASTM são definidas por um conjunto de caracteres alfanuméricos conforme sua composição química e os tratamentos térmicos utilizados na produção (ASM METALS

HANDBOOK, 1992). Assim, a nomenclatura pode ser definida em quatro partes, duas letras e dois algarismos.

A primeira parte da classificação é composta por duas letras indicando os dois principais elementos de liga e as letras por meio dos quais esses elementos são designados.

A segunda parte da classificação é constituída por dois algarismos que indicam a porcentagem dos dois principais elementos de liga.

A terceira parte corresponde a uma letra sequencial atribuída a ordem de patente que permite diferenciação entre ligas com o mesmo teor de elementos de liga (A significa: primeira liga registrada, B: segunda liga, C: terceira liga registrada, D: liga de alta pureza, E: liga de alta resistência à corrosão, X1: liga não registrada).

E a quarta parte é denotada pelas letras e números que aparecem após o hífen e identifica o tipo de tratamento térmico ou mecânico no qual a liga foi sujeita.

Por exemplo, na liga AZ92A-T6, sabe-se pela nomenclatura que a liga contém 9% de alumínio e 2% de zinco na sua composição química. A letra A indica que a liga foi registrada na ASTM como primeira liga que contém essa composição, o T6 após o hífen significa que a liga foi submetida ao tratamento térmico de solubilização e de envelhecimento (ERICKSON, 1990). Na tabela 2.3 é possível verificar um breve resumo sobre a nomenclatura e tratamentos termomecânicos.

Tabela 2.3 Nomenclatura dos elementos e tratamentos termomecânicos.

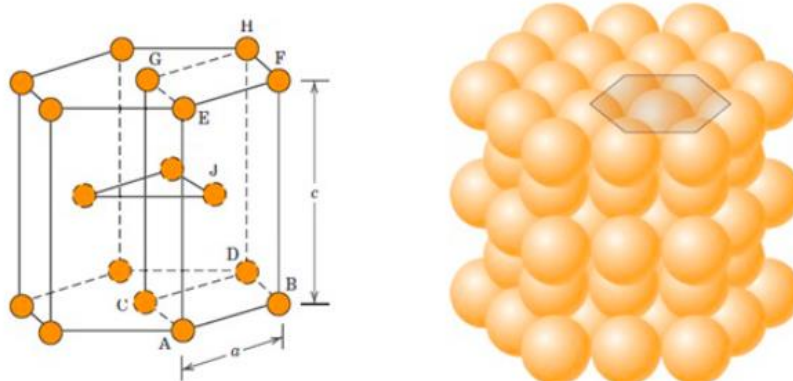
Símbolos dos elementos	Símbolos dos tratamentos térmicos e mecânicos
A: alumínio	F: como fabricado
E: terras raras	O: recozido
F: tório	H10 a H11: levemente encruado
K: zircônio	H23, H24, H26: encruado e parcialmente recozido
M: manganês	T4: solubilizado
O: prata	T5: envelhecido artificialmente
Z: zinco	T6: solubilizada e envelhecida artificialmente

Fonte: ASM METALS HANDBOOK, 1992.

2.3.4 Cristalografia das ligas de magnésio

A estrutura hexagonal compacta (HC) das ligas de magnésio é obtida pelo empilhamento de dois hexágonos sobrepostos, ambos com um átomo centrado em suas bases, alternando por um plano intermediário composto por três átomos, conforme figura 2.3.

Figura 2.3 Estrutura hexagonal compacta do magnésio.



Fonte: CALLISTER, 2005.

Devido a estrutura apresentada nas ligas de magnésio, a deformabilidade é relativamente baixa em temperatura ambiente devido à dificuldade de movimentação dos planos de escorregamento, tendo os planos basais como preferenciais. Sendo assim, a microestrutura requer temperaturas de processamento relativamente elevadas como forma de ativar os sistemas de escorregamento piramidais e assim, facilitar a deformação da liga, elevando a deformabilidade da liga. (CALLISTER, 2005 e KAINER, 2003).

2.3.5 Aspectos da deformação das ligas de magnésio

A deformação de ligas de magnésio considera, principalmente, três parâmetros de processo: temperatura, velocidade de deformação e deformação equivalente. As três variáveis são interdependentes, ou seja, é necessário otimizar os três fatores para que os processos de transformação mecânica das ligas de magnésio sejam viáveis.

As ligas de magnésio possuem baixa deformabilidade em temperatura

ambiente, restringindo os processos de conformação a frio. Para se obter deformação nesta condição, velocidade de deformação baixas são necessárias e deformações efetivas pequenas, tornando o processo inviável em escala comercial. Assim, é necessário que o processo ocorra a quente (ASM METALS HANDBOOK, 1992). Ao trabalhar com as ligas de magnésio acima de 225 °C, planos piramidais são ativados, resultando em aumento na plasticidade do material. A tabela 2.4 apresenta faixas recomendadas para o processo de deformação a quente de algumas ligas de magnésio comerciais (ASM METALS HANDBOOK, 1992).

Tabela 2.4 Faixas de temperaturas recomendadas para o forjamento de ligas de magnésio.

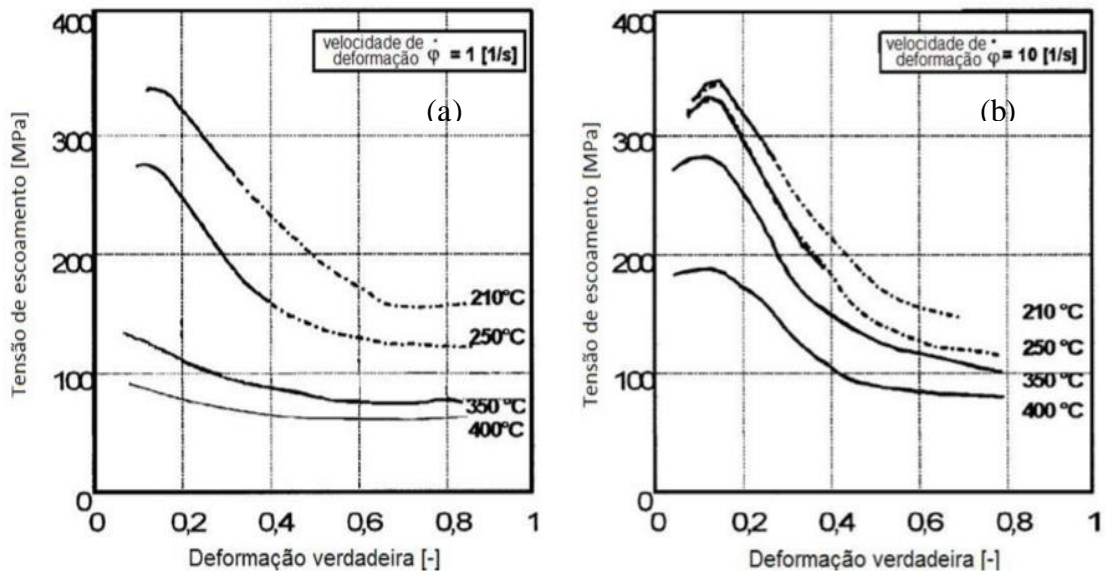
Ligas de magnésio	Temperatura da peça (°C)	Temperatura da matriz (°C)
AZ31B	290 – 345	260 – 315
AZ61A	315 – 360	290 – 345
AZ80A	290 – 400	205 - 290

Fonte: ASM METALS HANDBOOK, 1992.

Segundo Ogawa, 2002, em temperaturas abaixo da faixa de trabalho, algumas regiões podem ter a defomabilidade reduzida, pontualmente nas extremidades e faces expostas a trocas de calor, dando origem a núcleos de trincas por excesso de deformação. Já em temperaturas acima da faixa de trabalho, pode ocorrer a ativação de mecanismos de oxidação, reduzindo sua aplicação em diversos campos, Para evitar instabilidade no controle de temperaturas, é recomendado que no processo de deformação a quente das ligas de magnésio, as ferramentas de conformação também sejam aquecidas, de modo a restringir as trocas de calor entre o tarugo e o material da ferramenta (LIMA et al., 2011).

Em processos de deformação a quente, a velocidade de deformação influencia significativamente na resistência ao escoamento. Por exemplo, na liga de magnésio AZ61, em temperaturas entre 300 e 400 °C, a velocidade de deformação passa a ser um fator de grande relevância sobre a defomabilidade do material. Na figura 2.4 é apresentada duas comparações da curva de escoamento em compressão da liga AZ61A em condições diferentes de velocidade de deformação.

Figura 2.4 Curva de escoamento em compressão da liga AZ61A com (a) $\dot{\phi} = 1s^{-1}$ e (b) $\dot{\phi} = 10s^{-1}$.



Fonte: KAINER, 2003.

É possível verificar na figura 2.4 que independente da temperatura do processo, a força para iniciar a conformação da peça é maior no caso onde a velocidade de deformação é de $10 s^{-1}$ em relação ao caso onde se constata uma velocidade de deformação de $1 s^{-1}$. É possível verificar que nas temperaturas de transformação apresentadas, a tensão de escoamento é o dobro para a velocidade de deformação mais elevada em comparação direta com a velocidade de deformação de $1 s^{-1}$ (KAINER, 2003).

2.4 Ligas de magnésio – alumínio – zinco

As ligas de magnésio constituídas pelo sistema Mg-Al-Zn na condição de produto trabalhado e/ou fundido são utilizados em equipamentos de transporte terrestre e aéreo. Entre elas se podem mencionar as ligas forjadas de AZ31, AZ61 e AZ92 que são usadas na parte interna das portas dos automóveis, gabinetes de computador, câmeras e de forma limitada em estruturas de aeronaves (LETZIG, 2008).

Para processos de transformação mecânica à quente, as ligas usuais são AZ31B, AZ61A e AZ80. A primeira é utilizada no processo de forjamento que utiliza um martelo de queda livre que é feito com pancadas repetidas deformando pela energia cinética do martelo. Já a liga AZ80 tem maior resistência que a liga AZ61 (ASM

2.5 Liga AZ61

A liga comercial AZ61 que contém alumínio, zinco e manganês é uma liga deformável, que oferece leveza à suas aplicações. Devido a sua composição química, a liga AZ61 apresenta boa deformabilidade em estado recozido quando comparada a outras ligas de magnésio, permitindo assim, a utilização em operações de conformação mecânica em processos de forjamento e extrusão. (SKUBISZ, 2006). Sua composição química padrão pode ser analisada na tabela 2.5:

Tabela 2.5 Composição química padrão segundo norma UNS M11610 da liga AZ61.

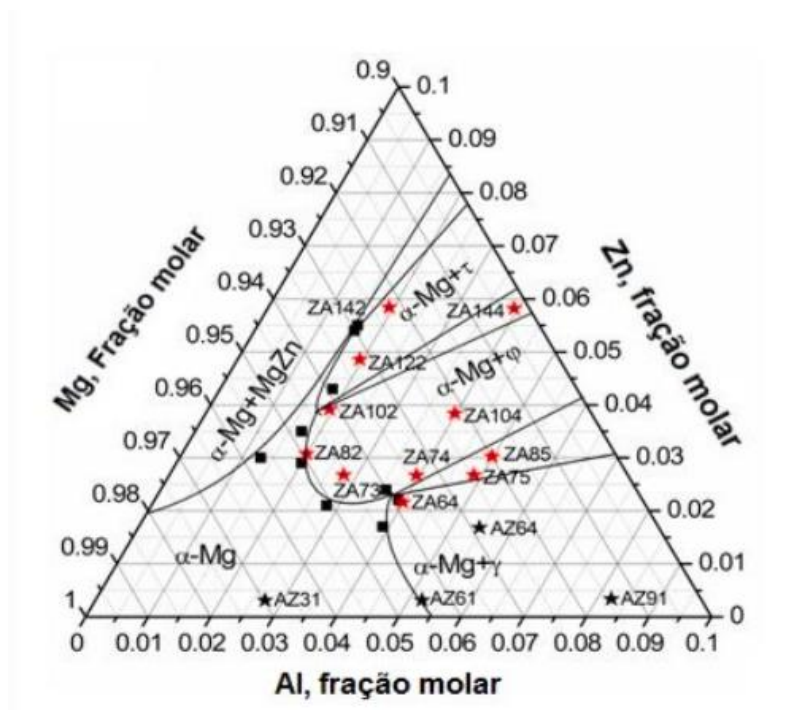
Elemento	Alumínio	Zinco	Manganês	Magnésio
% Mín. (peso)	5,80	0,40	0,15	restante
% Max. (peso)	7,20	1,50	0,50	restante

Fonte: KAINER, 2003.

A presença do alumínio, aproximadamente de 6% em massa, tem como objetivo aumentar a resistência mecânica. Devido a formação de precipitados próximo ao contorno de grão, como o $Mg_{17}Al_{12}$ (γ), há aumento da resistência mecânica das ligas de magnésio, ou seja, com o aumento do teor de alumínio, maior o aumento dessa propriedade. Por outro lado, quanto maior o teor de alumínio adicionado à liga, menor a deformabilidade característica do metal (ASM METALS HANDBOOK, 1992).

O teor de zinco adicionado à liga de magnésio aumenta a resistência do material e utiliza dos mesmos mecanismos do alumínio para tal acréscimo: formação de partículas de segunda fase, MgZn; no entanto, os precipitados ricos em zinco diminuem a ductilidade das ligas de magnésio. A adição de zinco à liga permite certo decréscimo no ponto de fusão do material, gerando economia durante o processo de fusão e de solidificação das ligas de magnésio (KAINER, 2003). No diagrama ternário apresentando na figura 2.5 é possível verificar as principais ligas comerciais de magnésio e sua distribuição em relação a fração molar.

Figura 2.5 Diagrama ternário de magnésio, alumínio e zinco em fração molar e suas respectivas ligas comerciais à 300 °C.



Fonte: CATORCENO, 2013.

No diagrama ternário isotérmico à 300 °C da figura 2.5, é possível identificar a liga de magnésio AZ61 na região central da base piramidal, além das demais ligas comerciais de magnésio. A região rica em magnésio do sistema Mg-Al-Zn apresenta uma fase α Mg em solução sólida com precipitados γ (CATORCENO, 2013).

Alguns elementos de liga podem ser adicionados para conferir melhoria nas características das ligas de magnésio. O cálcio, por exemplo, pode ser adicionado para refinar o grão, proporcionando maior controle na solidificação primária da liga e melhorando a resistência a fluência. Já os elementos de terras raras aumentam a resistência mecânica e resistência às elevadas temperaturas devido a formação de sistemas eutéticos com solubilidade limitada no magnésio (KAINER, 2003).

A combinação destes elementos na composição química das ligas de magnésio fornece a característica de elevada deformabilidade a quente quando comparada a outras ligas de magnésio. Com isso, é realizável a transformação mecânica da liga de magnésio AZ61 por meio do processo de forjamento. É possível verificar a condição como fabricado da liga de magnésio AZ61 na tabela 2.6 a seguir.

Tabela 2.6 Propriedades mecânicas da liga AZ61A-F.

Propriedades mecânicas	Valor
Dureza	68,9 ± 1,1 HB
Tensão de escoamento	152,8 ± 1,3 MPa
Tensão de ruptura	370,8 ± 10,8 MPa
Alongamento à temperatura ambiente	12,6 ± 0,4 %
Alongamento à temperatura de 315 C	70%
Módulo de Elasticidade	40,1 ± 0,6 GPa
Resistência ao impacto	4,1 J
Coefficiente de Poisson	0,35
Calor latente de fusão	373 kJ/kg
Condutividade térmica	80W/m.K
Coefficiente de expansão térmica	26 µm/m.K
Calor específico à temperatura ambiente	1,95 kJ/kg.K
Densidade	1800 kg/m ³

Fonte: ASM METALS HANDBOOK, 1992.

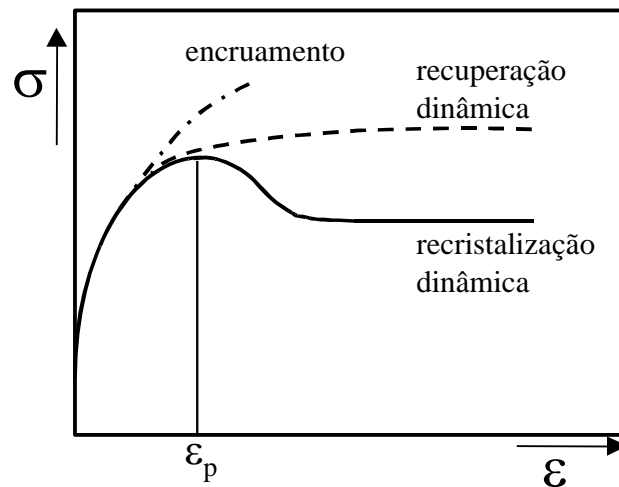
É ideal que a liga de magnésio AZ61 após ser deformada mecanicamente, seja submetida ao tratamento térmico para garantir melhores propriedades mecânicas. O tratamento térmico T5 é o indicado nesse caso e consiste em submeter a peça deformada a um envelhecimento artificial em forno, a uma temperatura de 180 °C, durante um período de 16 horas.

2.6 Aspectos metalúrgicos da deformação a quente

A maioria das ligas de magnésio passam por processos de deformação a quente para que sejam obtidos produtos finais. As transformações na microestrutura decorrente dos processos de transformação mecânica ocorrem em função da temperatura, taxa de deformação e intervalo entre passes (PADILHA, 2005). Esses parâmetros são importantes na conformação mecânica a quente, uma vez que a microestrutura obtida afeta as propriedades finais dos materiais. Os três fenômenos metalúrgicos que atuam durante a deformação quente são o encruamento, a recuperação e a recristalização (RODRIGUES, 2010).

Por meio da figura 2.6 é possível se observar uma curva esquemática de tensão-deformação mostrando comparativamente a ocorrência de encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica (SICILIANO, 2001).

Figura 2.6 Curva esquemática de tensão deformação e a ocorrência de encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica



Fonte: SICILIANO, 2001.

2.6.1 Encruamento

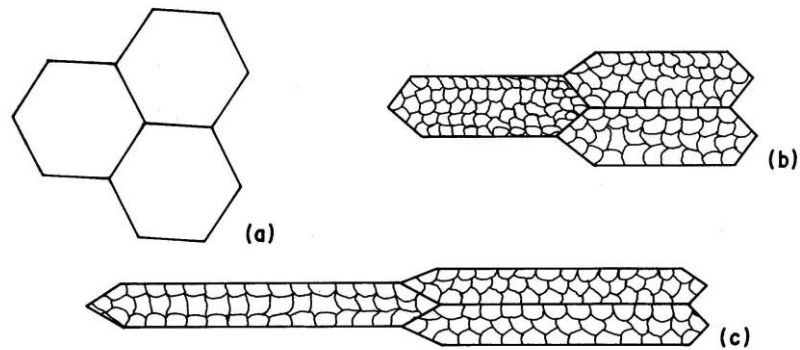
O encruamento é o aumento da resistência mecânica dos materiais durante a deformação plástica. Basicamente, o encruamento é caracterizado pelo aumento da densidade de discordâncias e pelo tipo de arranjo no qual estes defeitos se apresentam. Durante a deformação plástica do material, na rede cristalina, há duas classes de discordâncias: as móveis, onde há mudanças de forma ou acomodações nos cristais, e as imóveis, onde há acúmulo de interações entre si de forma aleatória, formando subestruturas aglomeradas (SOUZA, 2010).

2.6.2 Recuperação Dinâmica

A recuperação é caracterizada pela mudança microestrutural devido a redução da densidade de discordâncias. A redução da densidade de discordâncias é justificada pela difusão dos átomos e sua reordenação de uma estrutura celular de subgrãos. A transformação microestrutural de recuperação é conhecida como poligonização e

consiste no aumento do tamanho do subgrão com o aumento da temperatura (RODRIGUES, 2010). Na figura 2.7 é possível verificar as alterações microestruturais durante a recuperação dinâmica.

Figura 2.7 (a) Microestrutura inicial; (b) microestrutura após uma deformação; (c) microestrutura após segunda deformação.



Fonte: SICILIANO, 2001.

2.6.3 Recristalização Dinâmica

A recristalização ocorre quando há uma microestrutura de novos grãos que não apresenta evidências de deformação e a densidade de discordâncias tem valores baixos, tanto em seu interior como nos seus contornos. A etapa de recristalização ocorre apenas em temperaturas mais elevadas e tempos mais longo. Os grãos recristalizados são formados pelo crescimento de subgrãos na microestrutura deformada e recuperada, com configuração equiaxial (RODRIGUES, 2010).

2.8 Deformação à quente das ligas de magnésio

O processo de deformação das ligas de magnésio é usualmente aplicado em regime de temperatura entre 300 °C e 480 °C, dependendo da liga a ser deformada. No processo de deformação à quente, a microestrutura do material é refinada, apresentando um tamanho de grão intermediário de 20 µm. Além disso, é ideal o tratamento de alívio de tensões em ligas de magnésio, com objetivo de eliminar tensões residuais provenientes de processamento anterior (XU et al., 2013).

As ligas de magnésio comerciais, como as do tipo AZ31 e AZ61, são processadas a quente com reduções de até 30% em sentido unidirecional sem a ocorrência de trincas no material (XU et al., 2013). Como tais percentuais de redução são limitados, é necessário reaquecimento intermediário, tornando o processo inviável e de custo mais elevado.

As propriedades mecânicas são determinadas pelo tamanho de grão final e pela sua textura cristalográfica. Para otimizar a microestrutura, é ideal o controle da temperatura de deformação, da taxa de resfriamento e dos parâmetros de deformação, os quais irão influenciar no encruamento, recuperação e recristalização do material (XU et al., 2013).

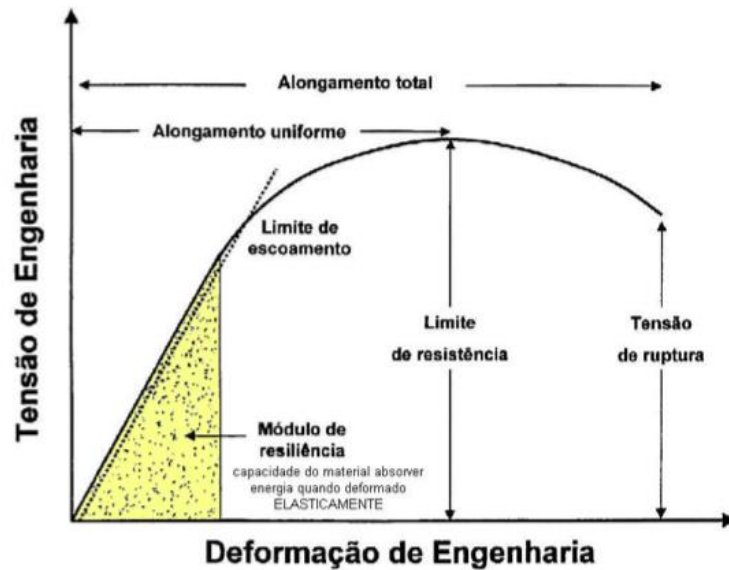
2.9 Curva de escoamento

Para provocar-se deformação plástica no material, é necessário atingir a tensão de escoamento do mesmo, k_f . Ensaio de tração e compressão, com mínimo atrito possível, são utilizados para aquisição do k_f . A tensão de escoamento depende de fatores como: temperatura, composição do material, microestrutura, deformação e velocidade de deformação aplicada (SCHAEFFER, 2016).

A curva de escoamento mostra o comportamento do material ao longo da deformação do corpo de prova. Através dela, consegue-se obter a tensão necessária para atingir a deformação plástica do material. Para aquisição de dados de grandes deformações, são utilizados ensaios de compressão ante os de tração (CALLISTER, 2005).

Através do ensaio de compressão, é possível determinar-se o limite de proporcionalidade, limite de escoamento e módulo de elasticidade de um material; no entanto, é impossível determinar a carga máxima atingida ou de ruptura em materiais dúcteis, pois o corpo de prova é achatado até se transformar em um disco. Na figura 2.8 é possível verificar o comportamento da curva de escoamento esquemática.

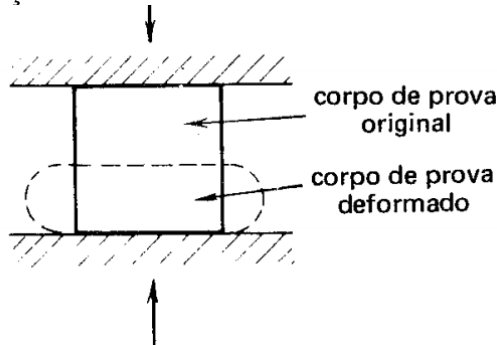
Figura 2.8 Curva de escoamento esquemática.



Fonte: CALLISTER, 2005.

Para realizar o ensaio, é necessária a utilização de uma máquina de ensaios universais, duas matrizes planas paralelas e lubrificantes entre as matrizes e o corpo de prova. A necessidade do uso do lubrificante se dá ao embarilhamento provocado pelo atrito entre as matrizes e o corpo de prova. As tensões produzidas pelo atrito tendem a retardar o escoamento nas regiões próximas ao contato, causando um gradiente de tensões ao longo do comprimento do corpo de prova. Um modo de minimizar o atrito é a utilização de lubrificantes como parafina, graxa ou teflon. São limitações do ensaio de compressão: a dificuldade de aplicar-se uma carga axial ou verdadeiramente concêntrica, a ocorrência de atrito e a flambagem. Na figura 2.9, é possível verificar o comportamento do corpo de prova no ensaio de compressão.

Figura 2.9 Comportamento do corpo de prova antes e após o ensaio de compressão para obtenção da curva de escoamento.



Fonte: CALLISTER, 2005.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Com intuito de caracterizar a liga de magnésio AZ61, o presente trabalho visa avaliar a composição química, microestrutura, dureza e resistência mecânica à compressão.

Nesse capítulo são descritos os materiais, a metodologia e as condições de ensaios utilizados no estudo do comportamento da liga de magnésio AZ61 deformada a quente. Além disso, se descreve as etapas envolvidas no trabalho experimental.

3.1 Materiais

A liga de magnésio AZ61 laminada, analisada nesse trabalho, é originária da empresa RIMA, sendo única fornecedora de ligas de magnésio no Brasil.

A tabela 3.1 apresenta os valores da composição química da matéria prima utilizada, de acordo com o certificado de garantia do fornecedor da liga estudada. A análise de composição química foi realizada pela técnica de espectrometria de fluorescência de raio X ProSpector 3, marca Elvatech, do Laboratório de Processos Eletroquímicos e Corrosão desta Universidade, utilizando-se o método semi-quantitativo que reconhece elementos com teores acima de 0,01% em massa. Os dados são apresentados posteriormente em resultados.

Tabela 3.1 Composição química da liga AZ61 em % de massa.

Mg	Al	Zn	Mn	Si	Outros
92,62	6,21	0,76	0,16	0,02	<0,23

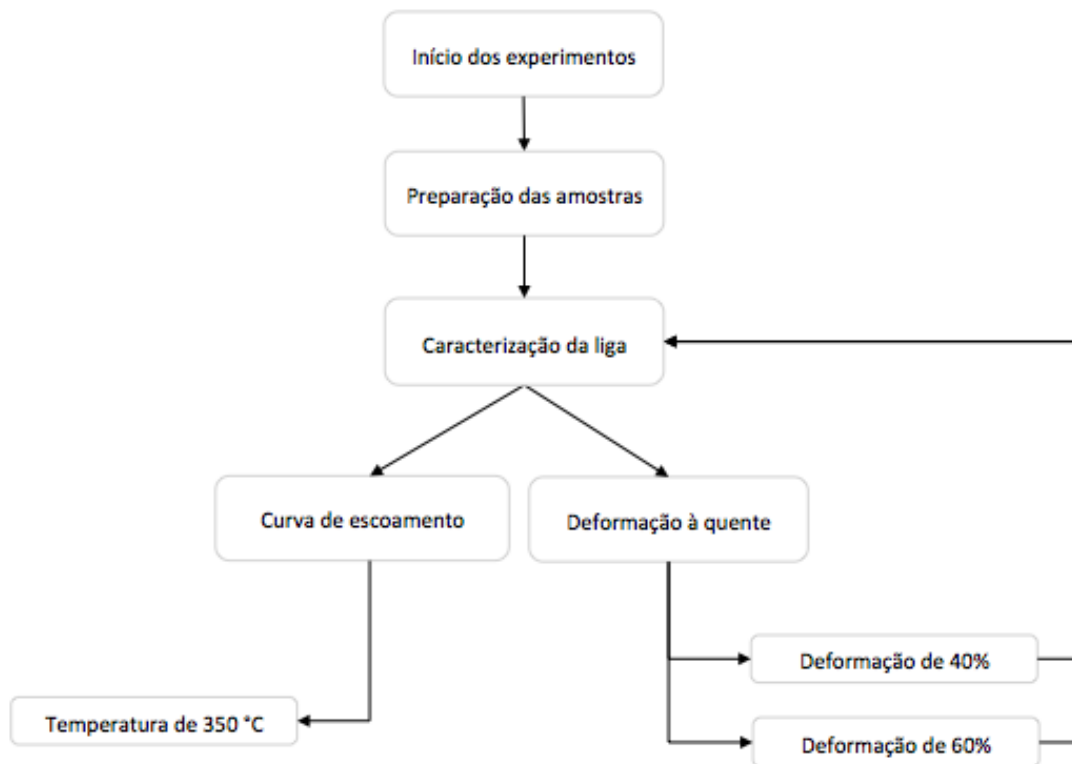
Fonte: fornecedor RIMA.

As matrizes para deformação a quente foram confeccionadas a partir de um aço ferramenta H13. Tal escolha se justifica pela condição de trabalho à quente. Esse material foi submetido a tratamento térmico de têmpera e duplo revenimento, obtendo como dureza final, em trabalho, de 40 a 44 HC.

3.2 Metodologia

Com o objetivo de estudar o comportamento da liga AZ61, foram realizados ensaios para a caracterização por meio da curva de escoamento e da deformação a quente. As diversas etapas são apresentadas na figura 3.1.

Figura 3.1 Fluxograma sobre as etapas realizadas no presente trabalho.

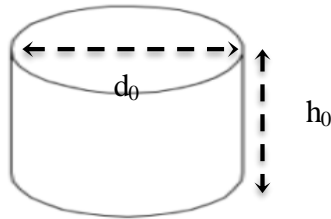


Na etapa de preparação das amostras, o corte das amostras foi realizado para caracterização estrutural, para determinação da condição de escoamento e para os processos de deformação.

O corte foi realizado no Laboratório de Metalurgia Física, desta Universidade, com sistema de corte a frio que utiliza um disco fino para realizar cortes em baixa velocidade. O material que se encontrava na forma de barra de diâmetro de 24 mm foi cortado em cinco corpos de prova, quatro corpos de prova de 8 mm de altura para caracterização inicial e para deformação à quente (posterior caracterização) e um corpo

de 15 mm de altura para a construção da curva de escoamento. Na figura 3.2 é possível verificar o exemplo da amostra utilizada para deformação à quente através de desenho técnico.

Figura 3.2 Desenho técnico do corpo de prova de liga de magnésio AZ61, com diâmetro $d_0 = 24$ mm e $h_0 = 8$ e 15 mm.



3.2.1 Caracterização microestrutural

Para o estudo da liga de magnésio foi realizado a caracterização estrutural utilizando as técnicas de microscopia óptica (MO). A técnica serviu para observação da forma e distribuição dos grãos, bem como a forma e distribuição dos precipitados. As imagens foram obtidas em modo de campo claro.

Durante a preparação metalográfica, a amostra foi embutida a quente em resina e sua preparação seguiu o procedimento padrão de preparação de amostras. Inicialmente, o lixamento mecânico seguiu a seguinte ordem de lixas: 80, 120, 320, 600, 100, 1200. Na sequência, o polimento foi realizado em duas etapas: o primeiro com pasta de diamante de 5,0 μm e o segundo com pasta de diamante de 1,0 μm . E por fim, para revelar a microestrutura, foi realizado ataque com ácido fluorídrico 10% em meio aquoso (HANDBOOK, 2002).

3.2.2 Dureza Brinell

Com o intuito de verificar se houve variação da dureza em relação as deformações feitas e avaliar o aumento de resistência, os ensaios de dureza foram feitos no durômetro com esfera WC no Laboratório de Metalurgia Física desta Universidade, com diâmetro de 2,5 mm e carga de 62,5 kgf. O teste de dureza Brinell consiste na impressão de um diâmetro sobre a superfície metálica. Os valores de

diâmetro são medidos e a média dos valores em mm é utilizada para consultar uma tabela de valores padrões. As amostras foram lixadas para planificar a superfície e eliminar óxidos.

3.3 Condições de Ensaio

Os ensaios para caracterização da liga de magnésio AZ61 foram realizados por ensaios de compressão. O objetivo da validação da condição de ensaio é importante pois garante condição o mais próximo da literatura. A temperatura durante o ensaio é mantida constante devido ao sistema ferramental de matrizes planas e de “copo quente”. Na figura 3.3, é possível verificar a estrutura utilizada no ensaio.

Figura 3.3 (a) Estrutura de matriz superior e inferior, corpo de prova e batente; (b) Estrutura “copo quente”.



Os ensaios experimentais ocorreram na seguinte ordem: montagem do ferramental, aquecimento do conjunto, posicionamento na matriz, ensaio de compressão, remoção do corpo de prova do ferramental e resfriamento ao ar.

A lubrificação utilizada entre o corpo de prova e as matrizes foi uma suspensão de grafita Lubrodal AT 737 F, produzido pela FUCHS do Brasil.

3.3.1 Temperatura

A temperatura de aquecimento para os ensaios escolhida foi de 350 °C. Com o objetivo de realizar o ensaio de compressão a quente, a escolha da temperatura é justificada por ser o valor intermediário das temperaturas de trabalho da liga AZ61, conforme apresentado anteriormente.

A definição do tempo de aquecimento da estrutura corpo de prova e ferramenta se deu através de um termopar tipo K de 1,5 mm de diâmetro posicionado na parte interna da ferramenta. Assim, ocorreu a completa homogeneização da temperatura de ensaio em 1h e 40 minutos para as peças de altura 15 mm (amostra 1) e 1h para as peças de altura 8 mm (deformação – amostras 2 e 3). É possível verificar na tabela 3.2 o esquema utilizado para aquecimento.

Tabela 3.2 Esquema de roteiro do aquecimento.

Amostra	Rota	Temperatura	Tempo	Altura inicial
1	Curva de escoamento	350 °C	1h 40 min	15 mm
2	Deformação 40%	350 °C	1h	8 mm
3	Deformação 60%	350 °C	1h	8 mm

3.3.2 Velocidade de deformação

Com o objetivo de garantir baixa velocidade de deformação, foram realizados os cálculos das velocidades de deformação conforme cada redução desejada. Para as amostras de deformação 40 e 60%, as velocidades foram de 4,7 s⁻¹ e 3,1 s⁻¹, respectivamente. Para a deformação da amostra 1, a redução até 8 mm de altura resultou em uma velocidade de deformação de 1,8 s⁻¹. Os cálculos são apresentados a seguir.

$$\dot{\phi}_{f_0} = \frac{V_{prensagem}}{h_0} = s^{-1}$$

$$\dot{\phi}_{f_{40\%}} = \frac{15}{3,2} = 4,7 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\phi}_{f_{60\%}} = \frac{15}{4,8} = 3,1 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\phi}_l = \frac{15}{8} = 1,8 \text{ s}^{-1}$$

Além disso, como já apresentado anteriormente, uma velocidade de deformação baixa é um dos fatores importantes para deformação das ligas de magnésio, pela sensibilidade às altas taxas de deformação. As velocidades de deformações calculadas ficam na faixa entre 2 s^{-1} , 5 s^{-1} , compatíveis com as apresentadas na Figura 2.4.

Os ensaios de compressão foram realizados na prensa hidráulica, modelo PKL40, marca EKA, com capacidade de 400 kN e velocidade de prensagem igual a 15 mm/s e é apresentada na figura 3.4.

Figura 3.4 Prensa hidráulica modelo PKL40 utilizada nos ensaios.



Para registrar a força aplicada no ensaio de compressão, foi utilizada uma célula de carga, com capacidade para 400 kN de força mensurável. Os dados de deslocamento da mesa foram obtidos utilizando um sensor de deslocamento do tipo LVDT.

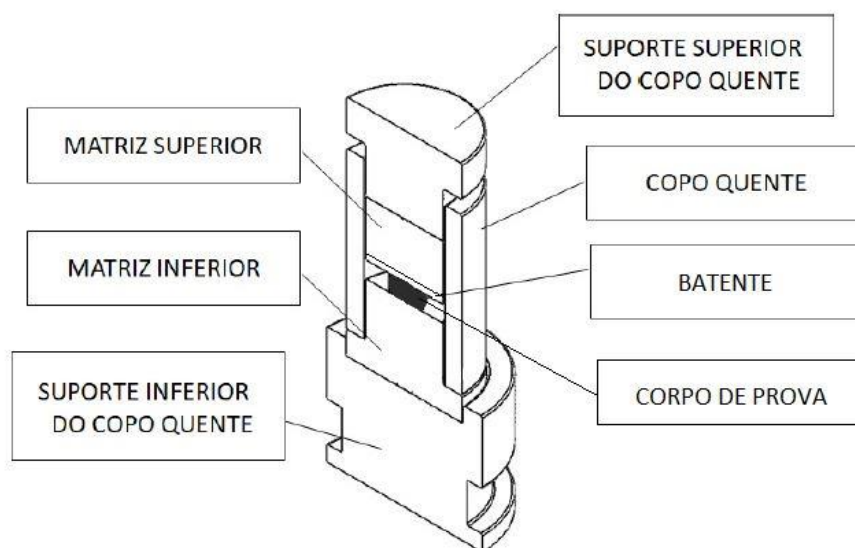
3.3.3 Projeto das matrizes

O “corpo quente” é uma estrutura cilíndrica, produzida de aço ferramenta H13 para trabalho a quente, que é aquecido juntamente com o corpo de prova. Assim, o ensaio é *quasi*-isotérmico.

Durante o aquecimento, o corpo de prova é posicionado no interior do conjunto matrizes de compressão, superior e inferior, e do “copo quente”, que fecham as aberturas do cilindro, concentrando o calor e assim, reduzindo perdas de calor para o exterior após a retirada do conjunto do forno de aquecimento.

Foi necessário que a matriz superior e inferior e os batentes fossem posicionadas dentro da estrutura do “copo quente” levando em consideração o deslocamento da prensa durante os ensaios. O ferramental construído pode ser observado na figura 3.5.

Figura 3.5 Representação esquemática do ferramental para os ensaios de compressão.



Para atingir as deformações de 40 e 60% foram construídos batentes para serem posicionados sobre o corpo de prova e serviram para determinar a altura de deformação, relacionando com a deformação desejada. A escolha das deformações está relacionada em estudar a condição extrema de deformação da liga de magnésio AZ61. Na tabela 3.3 é possível verificar altura do batente com relação a deformação desejada.

Tabela 3.3 Relação da deformação e da altura do batente.

Altura inicial corpo de prova	Deformação em relação a altura	Altura batente	Altura final corpo de prova desejada (h_0)
8 mm	40%	3,2 mm	4,8 mm
8 mm	60%	4,8 mm	3,2 mm

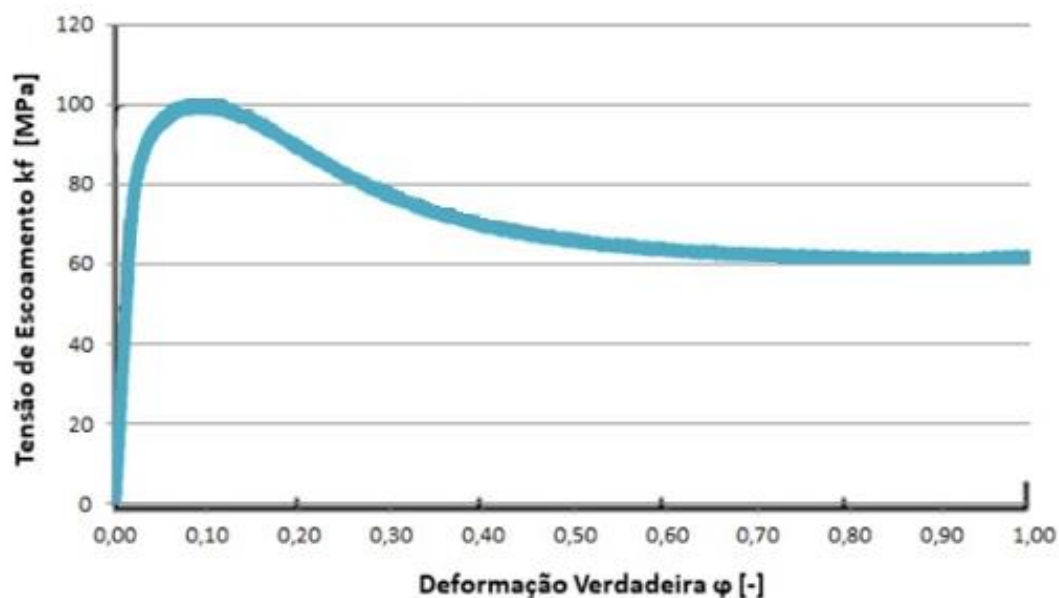
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados da caracterização na seguinte sequência: curva de escoamento, composição química, dureza e avaliação microestrutural.

4.1 Curva de escoamento da liga de magnésio AZ61

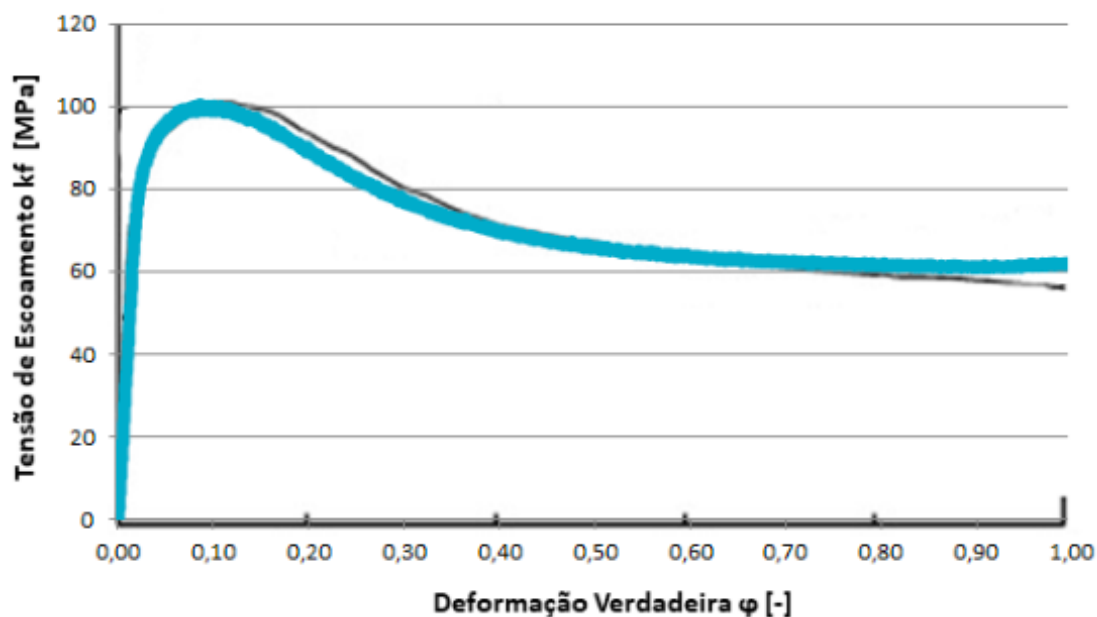
A curva de escoamento verdadeira da liga de magnésio AZ61 foi obtida através do ensaio de compressão de uma amostra a 350 °C. Uma vez que o ensaio foi realizado a quente, para manter o ensaio isotérmico o mesmo foi realizado utilizando a ferramenta de copo quente, garantindo a temperatura constante durante a construção da curva de escoamento. A figura 4.1 mostra a curva de escoamento para o ensaio a partir dos dados de força e de deslocamento convertidas em tensão verdadeira e deformação logarítmica.

Figura 4.1 Curva de escoamento a 350 °C da liga de magnésio AZ61 com velocidade de deformação entre 2 e 5 s⁻¹.



Para validação dos resultados, na figura 4.2. é possível comparar a curva obtida com uma curva presente na literatura. A curva em preto refere-se a curva elaborada por KAINER em 2003, na temperatura de 350 °C e com velocidade de deformação intermediária de 5 s⁻¹.

Figura 4.2 Curva de escoamento a 350 °C da liga de magnésio AZ61 com velocidade de deformação entre 2 e 5 s⁻¹ emcomparada com a curva KAINER em preto com velocidade de deformação de 5 s⁻¹.



Ao analisar as duas curvas, ensaio de compressão e literatura, é possível verificar que as curvas são semelhantes, validando os resultados. Devido tal semelhança, é possível validar a utilização do copo quente durante o ensaio para inibir a perda de temperatura. Além disso, por se tratar de deformação à quente, a reorganização estrutural produzida pelas deformações, devido a interações dos deslizamentos de planos, favorece a recristalização dinâmica da liga deformada à quente.

4.2 Composição química

A composição química nominal da liga de magnésio AZ61 detectou cinco elementos majoritários. O resultado da análise é mostrado na tabela 4.1 e é possível verificar a proximidade aos valores da composição química especificada pelo fornecedor, validando os resultados.

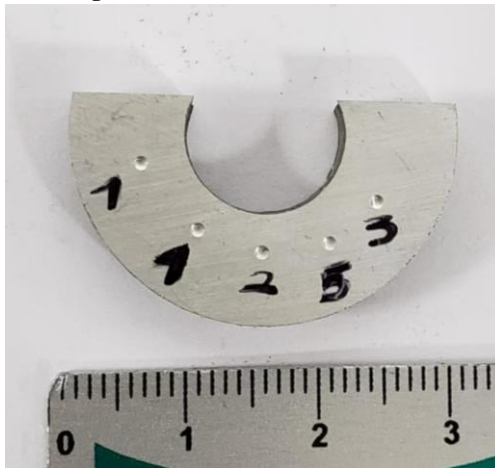
Tabela 4.1 Resultados da análise de composição química (% em massa).

Mg	Al	Zn	Mn	Outros
92,64	6,09	1,76	0,10	<0,6

4.3 Dureza

A amostra no estado inicial, com e sem alívio de tensão, e as amostras deformadas em 40% e 60% com relação a altura foram submetidas ao ensaio de dureza. Na figura 4.3 é possível visualizar as impressões nas amostras.

Figura 4.3 Impressão na superfície das amostras.



Fonte: própria.

A avaliação foi feita sobre cinco pontos e extraído a média e o desvio padrão dos resultados. Na tabela 4.2 são apresentados os valores de dureza Brinell relacionando a condição das amostras.

Tabela 4.2 Valores de dureza Brinell.

Condição da amostra	Dureza Brinell (HB)	Desvio padrão
Inicial (sem alívio de tensão)	73,7	0,8
Inicial (com alívio de tensão)	69,2	0,7
Deformada 40%	80,0	0,8
Deformada 60%	78,1	0,2

Fonte: própria

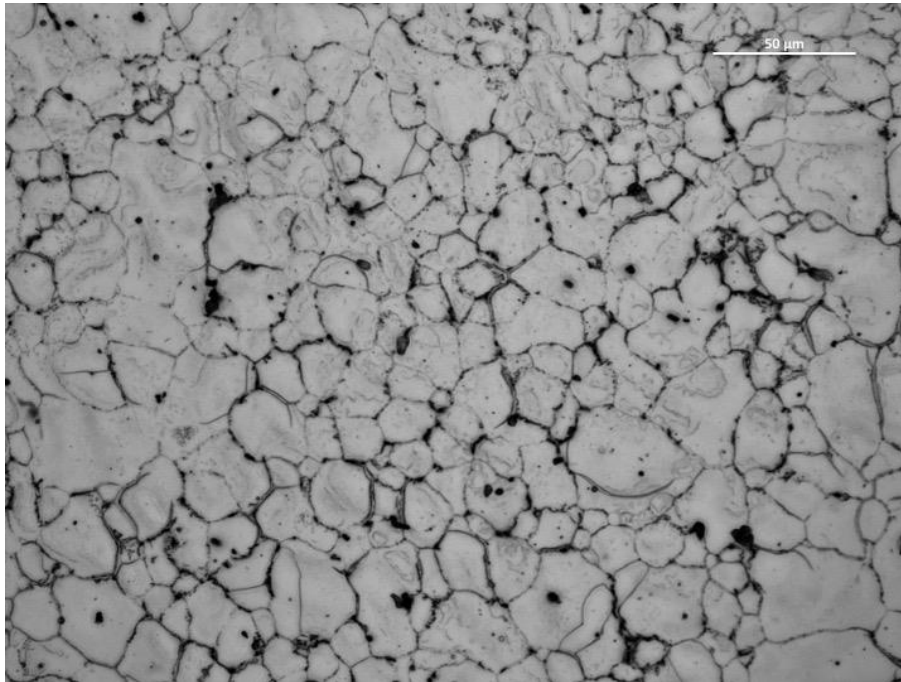
A dureza Brinell da amostra inicial é condizente com a sua condição laminada recristalizada. Após a homogeneização da temperatura no forno, o alívio de tensões na microestrutura reduz a dureza da amostra inicial. As tensões residuais do material devem ser eliminadas através de um tratamento térmico de alívio de tensões, onde a peça é aquecida até a temperatura recomendada e mantida a essa temperatura por tempo suficiente para uniformizar (CALLISTER, 2005). Assim, o tempo de aquecimento da peça tem duas funções: homogeneizar a temperatura de trabalho para a deformação a quente e aliviar tensões residuais.

É possível verificar o incremento da dureza nas amostras deformadas. O aumento da dureza é justificado à interação dos mecanismos de deformação com a redistribuição de finos precipitados na matriz, ou seja, o aumento da dureza é resultado das tensões e deformações que os átomos do soluto impõem no reticulado da matriz (BROOKS, 1982).

4.4 Avaliação microestrutural

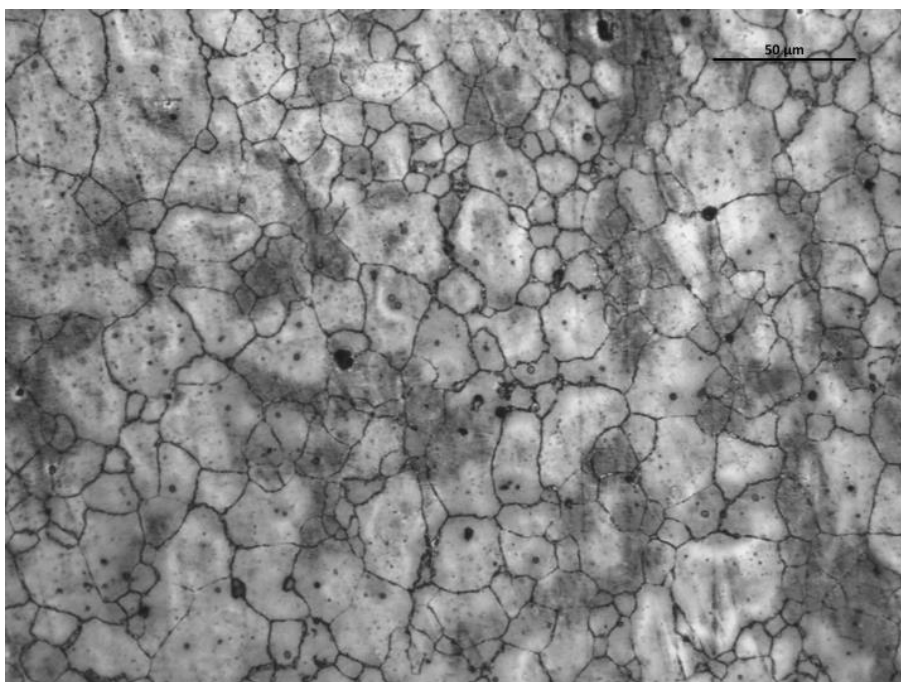
A avaliação microestrutural da amostra inicial na condição do material recebido é apresentada na figura 4.4. É possível identificar uma microestrutura típica de materiais recristalizados, com morfologia de grãos equiaxiais. Além disso, é notável a distribuição de tamanho de grão, sendo bastante heterogênea. Na microestrutura, destacam-se precipitados de aglomerados e isolados na microestrutura.

Figura 4.4 Microestrutura da liga de magnésio AZ61 na condição inicial.



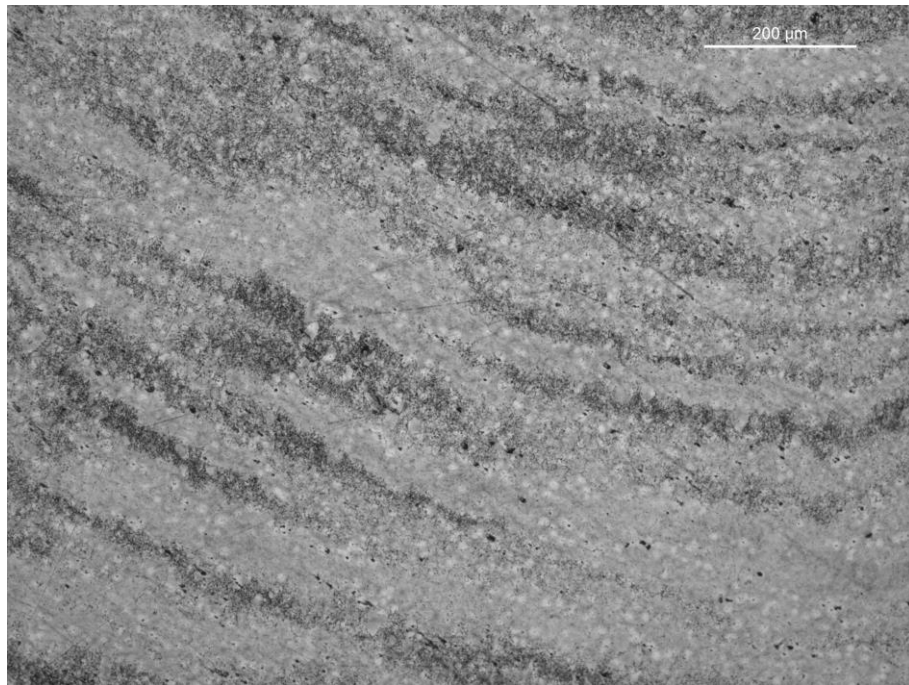
Na figura 4.5 é apresentada a microestrutura da amostra após permanecer 1h a 350 °C a fim de aliviar tensões. É possível verificar que não houve mudança significativa no tamanho de grão ao comparar a condição inicial. No entanto, os alguns precipitados γ se distribuem na matriz, possivelmente causado pela difusão dos componentes dos precipitados, devido a exposição a elevadas temperaturas.

Figura 4.5 Microestrutura da liga de magnésio AZ61 após alívio de tensões.



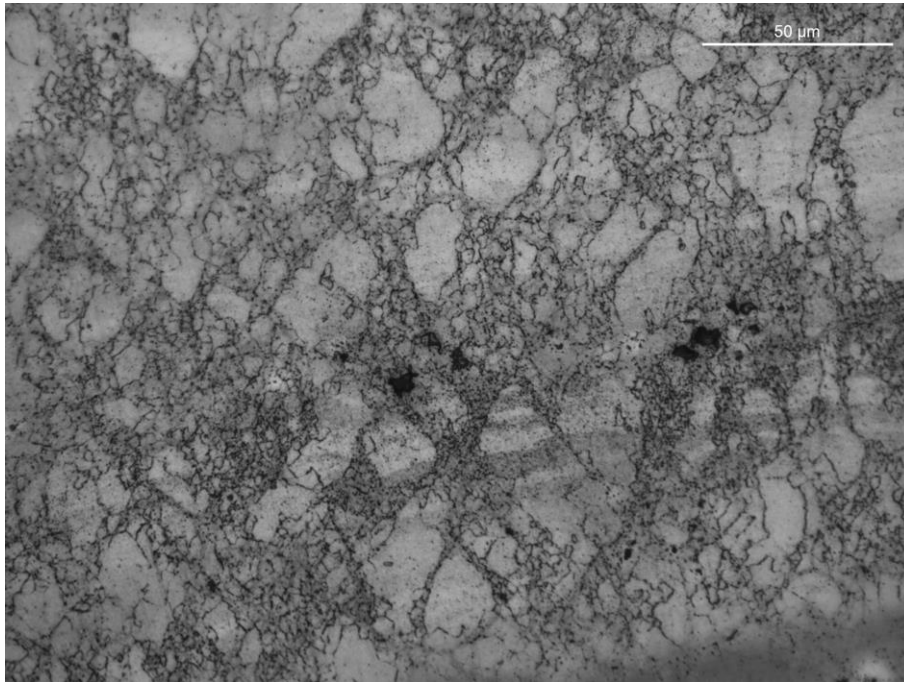
Na figura 4.6 é apresentada a microestrutura transversal a fim de mostrar as linhas de fluxo do processo de deformação. O aumento de 10x foi escolhido justamente para demonstrar a deformação na liga de magnésio AZ61. As linhas de deslizamento são notáveis em condições de deformação plana (ASM METALS HANDBOOK, 1992).

Figura 4.6 Microestrutura da liga de magnésio AZ61 deformada 40% em evidência as linhas de fluxo.



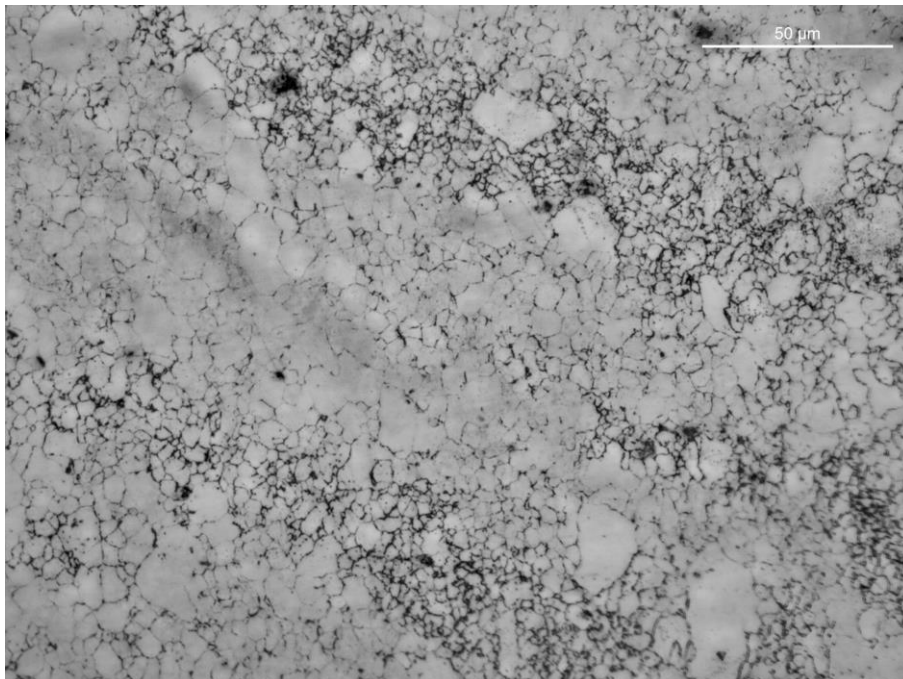
Na figura 4.7 é mostrada a microestrutura da liga deformada em 40% em relação a altura. É possível identificar diferença na heterogeneidade microestrutural. É possível verificar o refinamento dos grãos pela da recristalização dinâmica e o endurecimento por precipitação de fases intermetálicas γ , influenciados pelo grau de deformação.

Figura 4.7 Microestrutura da liga de magnésio AZ61 deformada 40%.



Por fim, na figura 4.8. é apresentada a microestrutura da liga de magnésio deformada em 60% em relação à altura. Há bastante semelhança entre a microestrutura da figura 4.7. No entanto, há ligeiro decréscimo no refinamento da microestrutura; no entanto, a microestrutura se encontra refinada ao comparada a condição inicial devido ao mecanismo da recristalização dinâmica.

Figura 4.8 Microestrutura da liga de magnésio AZ61 deformada 60%.



5.0 CONCLUSÕES

A fim de aumentar as propriedades mecânicas e a deformabilidade das ligas de magnésio AZ61, o presente trabalho identificou nas duas deformações unidirecionais, o acréscimo de resistência mecânica e a de redução do tamanho de grão, evidenciados por meio de ensaio de dureza e de análise metalográfica.

A curva de escoamento apresentou resultados coerentes com a literatura, tornando os dados confiáveis. O conjunto de matrizes e “copo quente” se mostrou benéfico nos resultados, tornando o processo *quasi-isotérmico*.

Com relação à dureza, o grau de deformação não influenciou significativamente na variação da dureza; no entanto, é possível identificar que a ambas as deformações com relação a altura, 40 e 60%, apresentaram aumento, aproximadamente, de 13% de dureza em comparação ao estado inicial da amostra, contribuindo para o aumento da resistência.

É importante ressaltar que não houve ruptura e/ou trinca nas deformabilidades à 350 °C e para valores de deformação na faixa de 2 e 5 s⁻¹.

Nos resultados apresentados com relação a microestrutura, foi possível identificar, nas duas deformações propostas, o refinamento dos grãos devido à recristalização dinâmica e o endurecimento por precipitação de fases intermetálicas γ , influenciados pelo grau de deformação. No entanto, a deformação de 40% em relação à altura apresentou uma homogeneidade na microestrutura.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios com outros graus de deformação em relação a altura em ensaio unidirecional;
- Simular em software computacional para condições variadas de deformação, temperatura e velocidade de deformação;
- Realizar análise microestrutural de outro graus de deformação;
- Testar as deformações em outras temperaturas;
- Analisar a produção de um componente industrial com esta liga.

7.0 REFERÊNCIAS

- ASM METALS HANDBOOK, **Forming and Forging**. v. 14, 1992.
- ASM METALS HANDBOOK, **Heat Treatment of Nonferrous Alloys**. v. 4E, 1992.
- ASM METALS HANDBOOK, **Mechanical Testing and Evaluation**. v. 8, 1992.
- BROOKS, C., **Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys**. American Society for Metals (ASM). Metals Park. Ohio, USA. p. 253 -274, 1982. [SEP]
- CALLISTER, W., **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais**, 2ª ed, LTC, 2005.
- CATORCENO, L. L. C., **Estudo do encruamento, recristalização e crescimento de grão em chapa da liga de magnésio AZ31B**. Dissertação. Universidade de São Paulo, 2013.
- DAVIES, G.; ELSEVKER G., **Magnesium Materials for automotive bodies**. London, p-91, 2003.
- ERICKSON, S., **Magnesium (Mg), properties and selection; non ferrous alloys and special-purpose materials**. Metals Handbook: ASM International. v. 2, p-1132 – 1135, 1990. [SEP]
- FRIEDRICH, H. E.; MORDLIKE B.L., **Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemanha, 2006.
- GARCÍA, E. M., **Influence of alloying elements on the microstructure and mechanical [SEP]properties of extruded Mg-Zn based alloys**. Dissertação. Technischen [SEP]Universität Berlin, Alemanha, 2009
- GUPTA, M.; SHARON, N. M. L., **Magnesium, Magnesium Alloys and magnesium Composites**. A John Wiley e Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2011.
- HOUSH, S.; MIKUCKI, B., **Properties of magnesium alloys (Alloy AZ31B and AZ31C), properties and selection; non ferrous alloys and special-purpose materials**. Metals Handbook: ASM International. v. 2, p- 480-481, 1990. [SEP]
- KAINER, K. U., **Magnesium – Alloys and Technologies**. Willey-VCH, Alemanha, 2003.
- KLEINER, S.; UGGOWITZER, P., **Mechanical anisotropy of extruded Mg – 6% Al – 1% Zn alloy**. Materials Science and Engineering, v. 379, p-258 – 263, 2004.
- LETZIG, D. et al., **Wrought magnesium alloys for structural applications**. Materials Science and Technology. v. 24, p-991-996, 2008. [SEP]

LI, P. et al., **Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy sheets prepared by extruding and rolling**. Advanced Materials Research. v. 11, p-653-656, 2006. [SEP]

LIMA, D. R. S. et al., **Influência do número de etapas de conformação na evolução microestrutural e nas propriedades mecânicas da liga Mg AZ61 forjada**. Anais da 15 Conferência Internacional de Forjamento. Porto Alegre, 2011.

LUO, A. A., **Applications: aerospace, automotive and other structural applications of magnesium** USA, GM Global Research & Development, 2012.

MORDIKE, B. et al., **Magnesium properties-applications-potential**. Materials Science and Engineering A. v. 302, 2001.

OGAWA, N.; SHIOMI, M.; OSAKADA, K., **Forming limit of magnesium alloy at elevated temperatures for precision forging**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 42, pg-607–614, 2002.

PADILHA, A. F.; SICILIANO Jr. F., **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. ed. ABM Livros, p.13-161, 2005.

PEIXOTO, E. M. A., **Revista Química nova na escola – Magnésio**. v. 12, 2000.

PÉREZ-PRADO, M. T.; RUANO, O. A., **Texture evolution during annealing of magnesium AZ31 alloy**. Scripta Materialia, p-46 e 149–155, 2002.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P., **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação Plástica. (Vol. I)**. Lisboa, Portugal, 2010.

SHAEFFER, L., **Manufatura por Conformação Mecânica**. Porto Alegre, Imprensa Livre, 2016.

SICILIANO, Jr. F., **Recuperação e recristalização durante a deformação a quente**. ed. ABM Livros, p.45-100, 2001.

SKUBISZ, P., SINCZAK, J., BEDNAREK, S., **Forgeability of Mg–Al– Zn magnesium alloys in hot and warm closed die forging**. Journal of Materials Processing Technology. v.177, pg-210–213, 2006

SOUZA, A. L., **Estudo da tensão média de escoamento de aços laminados em tiras a quente**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

TAKUDA, H.; FUJIMOTO, H.; HATTA, N., **Modelling on flow stress of Mg– Al– Zn alloys at elevated temperatures**. Journal of Materials Processing Technology, p-80-81 e 513-516, 1998.

XU, C. et al., **Influence of rolling temperature on the microstructure and mechanical properties of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy sheets**. Materials Science and Engineering. v. 559, p-615-622, 2013.