

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais  
– PPGE3M

*Estudo do efeito de um tratamento térmico de envelhecimento na liga de magnésio AZ61 extrudada em condições diferentes de deformação*

Tiago de Sá Gomes

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais –  
PPGE3M

*Estudo do efeito de um tratamento térmico de envelhecimento na liga de magnésio AZ61 extrudada em condições diferentes de deformação*

Tiago de Sá Gomes

Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processo de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr-Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira (UFSC)

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos (PUCRS)

Dr.Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

*Aos meus pais Lédio e Alioni.*

*A Monica, Mirela, Tulio, Caio,*

*Vó Maricota, Pedro.*

*A Angeli.*

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE EQUAÇÕES.....	12
LISTA DE SIMBOLOS.....	13
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	16
1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	17
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 - Características das Ligas de Magnésio.....	19
2.1.1 - Propriedades mecânicas.....	19
2.1.2 - Principais elementos presentes nas ligas de magnésio.....	21
2.1.3 - Nomenclatura das Ligas de Magnésio.....	22
2.1.4 -Microestruturas do magnésio e suas ligas .....	23
2.2 - Liga de Magnésio AZ61.....	25
2.2.1 – Características .....	25
2.3 - O Processo de Extrusão.....	28
2.3.1 - Tipos de extrusão.....	29
2.3.1.1 - Extrusão direta.....	30
2.3.1.2 - Extrusão Indireta.....	32
2.3.2 - Parâmetros e fatores relevantes no processo de extrusão.....	34

2.4 - Extrusão de Ligas de Magnésio.....	35
2.5 - Tratamento Térmico de Liga Metálicas.....	38
2.5.1 - Tratamentos térmicos das ligas de magnésio da família AZ.....	39
2.6 - Simulação Computacional em Processo de Conformação Mecânica .....	42
3 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	45
3.1 – Matéria-prima.....	45
3.2 - Procedimentos do Processo de Extrusão.....	46
3.3 - Procedimentos de Análise das Peças Extrudadas.....	50
3.3.1 - Ensaio de dureza.....	51
3.3.2 – Análise metalográfica.....	51
3.3.3 - Ensaio de compressão.....	52
3.4 – Caracterização da Matéria-Prima.....	53
3.4 - Simulação Numérica do Processo.....	55
3.4.1 - Dados de Entrada.....	55
4 – RESULTADOS.....	59
4.1 - Resultados da Simulação Computacional das Extrusões.....	59
4.2 - Resultados das Extrusões Realizadas.....	62
4.5 – Ensaio de Dureza.....	69
4.6 – Ensaio de Resistência Mecânica à Compressão a Frio.....	70
4.7 – Metalografia.....	75
5 - CONCLUSÕES.....	81
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
7 - BIBLIOGRAFIA.....	84

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.- Ing. Lirio Schaeffer a confiança depositada em mim, a sua paciência e orientação desses últimos anos.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que me acolheu como se fosse a universidade que me graduou.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica, que disponibilizou todos os equipamentos, ferramentas e a locação para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido.

Ao Dr.Engº. Alberto Moreira Guerreiro Brito, que contribuiu nesse período de estudos esclarecendo as dúvidas quando surgiam. Sempre com muita paciência e prontidão.

Ao Msc. Engº. Diego Simões de Lima, que além de ser um excelente colega de trabalho, é também um grande amigo.

Aos Engenheiros Luiz Mario Angeloni, Gianpaulo Alves de Medeiros, Daniel Possamai, devido ao convívio durante esta etapa da vida.

Aos colegas de sala Engº. Tiago Colombo e a Tecgº Ângela Marques, Msc. Engº. Tomaz de Souza, que contribuíram no processo de pesquisa para a realização desse trabalho.

Ao Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis (GDER) representado por Engº. Diogo Ito, Engº. Leandro Pelegrini, Engº. Philippe Pauletti, Msc. Engº. Harold Luna e Msc. Engº. Patrik Bonaldi, por autorizarem o uso dos equipamentos pertencentes ao laboratório e a oportunidade de convivência e aprendizado.

A secretária do LdTM Agatha Bittencourt

A empresa alemã Otto Fuchs, pela doação da liga de magnésio AZ61 utilizada nesta tese.

Ao CNPq que colaborou nessa pesquisa financiando os meus estudos.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo entre ligas de magnésio e a liga de alumínio AA6082 [1] .....	20
Figura 2 – Peças forjadas em ligas de magnésio em estado bruto de fusão e recristalizado por extrusão [6] .....	21
Figura 3 - Célula unitária da estrutura hexagonal compacta [33]......	24
Figura 4 - hexagonal compacta e seus planos principais de deslizamento [10].....	25
Figura 5 - Curvas de escoamento da liga AZ61 em diferentes temperaturas e velocidades de deformação [11]. .....	27
Figura 6 - Modelo esquemático da extrusão direta. ....	30
Figura 7 - Modelo esquemático de parâmetros da matriz. ....	30
Figura 8 - Modelo esquemático da extrusão indireta.....	33
Figura 9 - Modelo representando altura inicial ( $h_0$ ) e altura final ( $h_1$ ) .....	34
Figura 10 - Ilustração da discretização da peça para a realização da simulação.....	43
Figura 11 - Exemplificação da mudança de geometria após a realização dos cálculos globais [25]. .....	44
Figura 12 - Comparação entre os modelos sólidos das matrizes de extrusão com diferentes ângulos de cone. (a) $30^\circ$ , (b) $60^\circ$ , (c) $90^\circ$ . ....	46
Figura 13 - Dimensões fixas para o punção e matrizes. (A) Punção. (B) Matrizes .....	47
Figura 14 - Esquema gráfico da distribuição e destinação dos billets a serem analisados .....	48
Figura 15 - Sistema (billet – ferramentas) que é levado ao forno para aquecimento e posterior extrusão. ....	49
Figura 16 - Durômetro marca Fortel empregado no estudo.....	51

Figura 17 - Microscópio ótico GX-51 empregado no estudo. ....	52
Figura 18 - Esquema gráfico da realização do ensaio de conformação. ....	53
Figura 19 – Microestrutura da liga de magnésio AZ61, antes do forjamento. ....	54
Figura 20 - Gráfico das curvas de escoamento de magnésio, obtidas do banco de dados do software para simulação.....	57
Figura 21 - Tela principal do software de simulação, durante montagem do processo .....	57
Figura 22 - Imagem retirada do software da malha utilizada no billet para simulação. ....	58
Figura 23 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de 30° e deformação de 40%, obtidos por simulação numérica computacional. ....	59
Figura 24 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de 60° e deformação de 40% tirados do programa de simulação.....	60
Figura 25 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de 90° e deformação de 40% obtidos do programa de simulação. ....	61
Figura 26 - Geometria final das peças em liga de magnésio extrudadas em matrizes com ângulos de (a) 30°; (b) 60° e (c) 90°.....	62
Figura 27 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de 30° e deformação de 40%.....	63
Figura 28 - Comparação entre as curvas experimentais e a curva obtida através da simulação para a matriz de ângulo 30° e deformação de 40%.....	64
Figura 29 - Gráfico Força x Deslocamento para matriz com ângulo de 60° e deformação de 40%.....	65
Figura 30 - Comparação entre as curvas experimentais e a curva obtida através da simulação para a matriz de ângulo 60° e deformação de 40%.....	66
Figura 31 - Gráfico Força x Deslocamento para matriz com ângulo de 90° e deformação de 40%.....	67

Figura 32 - Comparação entre as curvas experimentais e a curvas obtidas através da simulação para a matriz de ângulo 90° e deformação de 40%.....	67
Figura 33 - Imagem da impressão no corpo de prova com ângulo de 90° que sofreu o tratamento térmico. ....	69
Figura 34 - Amostras submetidas ao ensaio de compressão.....	71
Figura 35 - Gráfico comparativo Tensão x Deformação para matriz com ângulo de 30° e deformação de 40%, em corpos de prova com e sem tratamento.....	72
Figura 36 - Gráfico comparativo Tensão x Deformação para matrizes com ângulo de 60° e deformação de 40%, em corpos de prova com e sem tratamento. ....	73
Figura 37 - Gráfico comparativo Tensão x Deformação para matrizes com ângulo de 90° e deformação de 40%, em corpos de prova com e sem tratamento.....	74
Figura 38 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de com e de 30°, sem tratamento térmico. ....	75
Figura 39 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada em ferramenta de ângulo de 30°, tratadas termicamente. ....	76
Figura 40 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 60°, e sem tratamento térmico. ....	77
Figura 41 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e angulo de 60°, tratadas termicamente. ....	78
Figura 42 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 90°, e sem tratamento térmico. ....	79
Figura 43 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 60°, tratadas termicamente. ....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de algumas ligas de magnésio [6] .....	20
Tabela 2 - Principais elementos de ligas e seus efeitos em ligas de magnésio [5] .....	21
Tabela 3 - Principais elementos de ligas e seus efeitos em ligas de magnésio.....	22
Tabela 4 - Designação dos estados de fornecimento das ligas de magnésio. ....	23
Tabela 5 - Estrutura cristalina dos principais metais puros [8]. ....	24
Tabela 6 - Composição química da liga AZ61 (UNS M11610). ....	26
Tabela 7 - Propriedades da liga AZ61 T5 [13]. ....	27
Tabela 8 - Composição química da liga de magnésio estudada (em % de peso).....	54
Tabela 9 - Valores de dureza da matéria-prima .....	55
Tabela 10- Propriedades mecânicas à compressão da liga AZ61 não deformada.....	55
Tabela 11 - Propriedades necessárias para a realização da simulação.....	56
Tabela 12 - Propriedades necessárias para realização da simulação. ....	61
Tabela 13 - Resultado das forças máximas obtidas através das extrusões experimentais. .....	68
Tabela 14- Comparação das velocidades de deformações médias.....	69
Tabela 15 - Resultados de dureza das diferentes condições estudadas. ....	70
Tabela 16 - Resultados de deformação máxima e tensão máxima de ruptura para todos os casos estudados. ....	74

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Deformação verdadeira em função da área.....	31
Equação 2 - Força no processo de extrusão .....	31
Equação 3 - Velocidade de deformação.....	32
Equação 4 - Deformação Verdadeira em função da altura .....	33
Equação 5 - Fórmula simplificada de força .....	34

## LISTA DE SIMBOLOS

$\sigma_{esc}$  = Tensão de escoamento (MPa)

$\phi$  = deformação verdadeira em área (-)

$k_{fm}$  = Tensão de escoamento média (N/mm<sup>2</sup>)

$k_{f0}$  = Tensão de escoamento inicial (N/mm<sup>2</sup>)

$\mu$  = Coeficiente de atrito (-)

$\gamma$  = Semi-ângulo de cone (radianos);

$\beta$  = Ângulo oposto ao semi-ângulo de cone (radianos)

$\eta_F$  = Fator de rendimento do processo

$A_0$  = Área inicial (mm<sup>2</sup>)

$A_1$  = Área final (mm<sup>2</sup>)

$d_0$  = Diâmetro inicial da peça a ser extrudada (*blank*) (mm)

$D_0$  = Diâmetro inicial corpo de prova (mm)

$F$  = Força (N)

$F_{ext}$  = Força de extrusão (N)

$h$  = Altura instantânea (mm)

$h_0$  = Altura inicial (mm)

$h_1$  = Altura final (mm)

## RESUMO

Esse trabalho trata do estudo dos parâmetros para conformação de liga de magnésio AZ61, a qual possui baixa massa específica e relativamente boa resistência mecânica, quando corretamente processada. Porém, o magnésio apresenta algumas restrições quanto ao seu uso em processos de conformação mecânica. O processo de conformação utilizado nesse estudo é a extrusão direta, onde foram feitas três matrizes de configurações diferentes de processo. Essas matrizes produzem uma redução em área fixa, de 40% e possuem diferentes ângulos de cone, que são os de 30°, 60° e 90°, que levam ao canal de redução. Os projetos dos ferramentais foram feitos em um programa de CAD, sendo assim, possível integrar estes com o programa de simulação numérica computacional *Simufact. forming 9.0*, aplicado para predizer o comportamento do material no final de cada processo de extrusão. Foram analisados, por simulação numérica computacional, dados como força e as deformações finais. Foram extrudadas 8 peças com cada variação de ferramental, sendo que, durante as extrusões, a força de extrusão foi monitorada em cada processo. Metade das peças extrudadas foram submetidas a tratamento térmico T6. Foi avaliada a influência deste tratamento térmico na liga de magnésio AZ61 extrudada, nas três diferentes condições, sendo estas comparadas entre si através de ensaio de compressão, metalografia e dureza. Na análise de força, foi notado que a geometria que exigiu menor carga foi a constituída de ângulo de cone de 90°, seguida das geometrias de 60° e 30°, sendo esta última a que exigiu maior força de extrusão para obter as peças. Quando foi comparado o material extrudado tratado e não tratado termicamente observou-se que há uma diminuição nas propriedades mecânicas quando a liga foi submetida ao tratamento térmico. A diferença nos resultados de tensão máxima em porcentagem foi de 12,5% para liga proveniente da extrusão do ângulo 30°, 6,9% para o ângulo de 60°, e 7,3% para o ângulo de 90°. A dureza também diminuiu na porcentagem de 26,0%, 17,6%, 18,5% para as matrizes com ângulos de cone de 30°, 60°, e 90° respectivamente. Por fim, as análises metalográficas indicaram que os tratamentos térmicos impostos resultaram em um coalescimento dos precipitados  $Mg_{17}Al_{12}$ , além de crescimento de grão da matriz do

magnésio, de forma que estas mudanças microestruturais influenciaram na perda de propriedades mecânicas da peça extrudada.

## ABSTRACT

This work deals with the study of parameters related to extrusion process of a magnesium alloy, which has relatively low density and good mechanical strength, when properly processed. However, magnesium has some restrictions on its use in metal forming processes. The forming process used in this work is the forward extrusion. Three tools were made with different configurations of process. These tools produce a fixed reduction in area of 40% and have different cone angles, 30 °, 60 ° and 90 ° respectively, which lead to reducing channel. The tool geometries were made in a CAD software, and is thus possible to integrate these with the numerical simulation software *Simufact. forming 9.0*, applied to predict the behavior of material at the end of each extrusion process. Data such as force and final strains were analyzed by numerical simulation. Eight parts were extruded with each tool geometry, and during the extrusions, the force needed for extrusion was monitored in each process. Half of the extruded parts were submitted to heat treatment T6. The influence of heat treatment on extruded AZ61 magnesium alloy was evaluated for the three different conditions, which were compared with each other through compression testing, metallography and hardness. In the analysis of force, it was observed that the geometry which required less load was the geometry with cone angle of 90 °, followed by 60 ° and 30 °, the latter being the geometry that required largest load to extrude the parts. When comparing the extruded material heat treated and untreated, it was possible to observe a decrease in mechanical properties when the alloy was subjected to heat treatment. The percentage difference in maximum stress results was 12.5% for alloy extruded with 30° angle, 6.9% for 60° angle, and 7.3% for 90° angle. Hardness also decreased the percentage of 26.0%, 17.6%, 18.5% for the tools with cone angles of 30 °, 60 ° and 90 ° respectively. Finally, metallographic analysis indicated that the heat treatment applied resulted in a coalescence of Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> precipitates, and grain growth of magnesium matrix, so that these microstructural changes influenced the decrease in mechanical properties of the extruded part.

# 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O principal desafio das grandes companhias produtoras de sistemas mecânicos, nos mais diversos setores industriais – sobretudo nas áreas relacionadas aos transportes terrestres e aéreos – tem sido focado na economia de recursos energéticos e desenvolvimento de sistemas *ecofriendly*.

De acordo com essa realidade e motivado pela pressão de seguimentos da sociedade, as grandes companhias empenham crescentes investimentos em pesquisas, onde objetivam alcançar, entre outras soluções, a redução de peso dos componentes mecânicos [1]. Esta solução vem ao encontro de tendência apresentada no parágrafo anterior, permitindo com a redução de peso, uma economia de combustível, aumento no desempenho das máquinas e diminuição na emissão de poluentes.

A substituição dos materiais é o caminho mais frequente para a redução de peso dos componentes. Cada vez mais, as ligas ferrosas estão sendo substituídas por novos materiais, entre eles compostos poliméricos, fibras compósitas e ligas não ferrosas de baixa densidade. Entre os metais chamados de “liga-leve”, os mais presentes atualmente são as ligas de alumínio, ligas de titânio e, mais recentemente, as ligas de magnésio.

Ligas de magnésio possuem uma baixa densidade, em relação às demais ligas metálicas, permite que sua resistência específica seja a maior entre os metais de engenharia. Sendo o 6º elemento mais abundante na superfície terrestre, o magnésio vem sendo utilizado há muitos anos como opção entre os metais na fabricação de peças. No entanto, estas peças são, na grande maioria, obtidas por fundição, o que representa uma perda de resistência mecânica, quando se comparada a peças obtidas por processos de conformação mecânica.

Aliando-se a baixa densidade das ligas de magnésio, com o aumento de resistência que é característico dos processos de conformação, é possível se obter componentes mecânicos com uma resistência específica ainda maior, reduzindo o peso total dos sistemas em até 60%, na comparação direta com os aços mais comuns utilizados atualmente. Essa resistência mecânica pode ser incrementada ainda mais, aliando-se uma deformação controlada da liga de magnésio, com um tratamento térmico

adequado, gerando, assim, uma condição otimizada para credenciar as ligas de magnésio como substitutas das ligas ferrosas em grande parte dos componentes mecânicos.

Por outro lado, a conformação mecânica das ligas de magnésio ainda é um tema com muito a ser explorado [1]. Estas ligas dependem de condições especiais para serem deformadas, já que possuem uma baixa ductilidade em temperatura ambiente e, em temperaturas elevadas, podem desencadear mecanismos de corrosão acelerados e, até mesmo, entrarem em combustão, nos casos mais extremos.

Em suma, embora o potencial de utilização dessas ligas seja elevado, ainda faz-se necessário um maior estudo sobre a deformação das ligas, os efeitos da temperatura no processo e a efetividade de tratamentos térmicos nas peças conformadas, com o intuito de se reduzir o custo de fabricação [2] e permitir uma expansão da empregabilidade deste material em diversos campos industriais.

Desta forma, esta dissertação de mestrado investiga a deformação de uma liga de magnésio AZ61, quando submetida à extrusão direta em matrizes com 3 diferentes ângulos de cone. Objetiva-se avaliar a influência desta variação geométrica da ferramenta na força de conformação das amostras, além de verificar se estas mudanças interferem de alguma maneira nas propriedades mecânicas finais da peça extrudada.

O processo de extrusão foi ainda simulado computacionalmente, objetivando-se prever a força de extrusão em cada caso e, posteriormente, comparar com os resultados obtidos nos experimentos práticos.

Em adicional, é realizado um tratamento térmico T6 nas peças extrudadas, objetivando-se quantificar se existe e qual a magnitude da influência deste tratamento térmico nas propriedades mecânicas do material conformado.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - Características das Ligas de Magnésio**

As ligas de magnésio vêm ganhando importância em relação à materiais tradicionalmente consagrados pela indústria. Isso se deve ao fato do magnésio ter uma relação peso/resistência muito boa. Assim, esse material vem encrementando sua participação nas aplicações onde estas propriedades são de extrema importância, como na indústria aeronáutica e automobilística, por exemplo [3].

Comparando as densidades das ligas de magnésio, que é de aproximadamente  $1700 \text{ kg/m}^3$ , com as dos aços de  $7800 \text{ kg/m}^3$  e também com outros metais considerados ligas leves, como titânio de  $4300 \text{ kg/m}^3$  e alumínio de  $2700 \text{ kg/m}^3$ , é visível a relevância das ligas de magnésio para aplicações que necessitam redução de peso.

#### **2.1.1 - Propriedades mecânicas**

O magnésio possui relativa baixa resistência mecânica quando se comparado com outros metais de engenharia comuns, como aços e ligas de alumínio e titânio. No entanto, a baixa densidade deste material, o torna interessante para certas aplicações, pois a sua resistência específica acaba por ser a maior entre os metais anteriormente referidos. Na figura 1 pode se observar uma comparação entre quatro ligas de magnésio (AZ31, AZ61, AZ81), com a liga de alumínio AA6082 (T6).

Fica evidente que as ligas de magnésio apresentam uma maior relação resistência/peso em comparação com a liga de alumínio. Na figura 1, o caso de maior ganho é a da liga de magnésio ZK60 (liga de magnésio com adição de zinco e zircônio), que atinge reduções de peso da ordem de até 35%. Este comparativo reforça a valorização do magnésio para aplicações mecânicas de baixo peso.

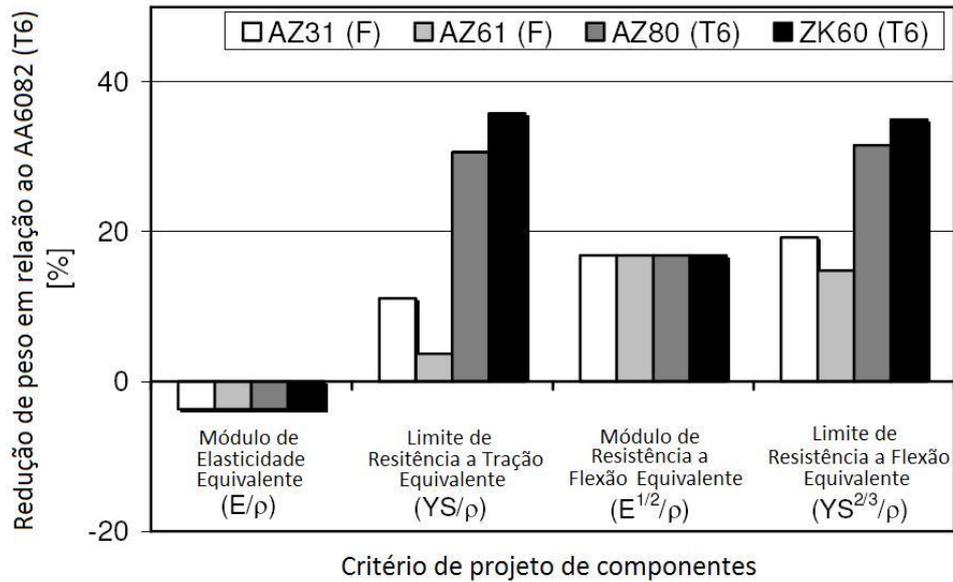


Figura 1 - Comparativo entre ligas de magnésio e a liga de alumínio AA6082 [1]

As ligas de magnésio também possuem desempenho superior às ligas de alumínio, quando o quesito é resistência a fadiga. Esta propriedade está diretamente relacionado ao arranjo cristalino do magnésio, hexagonal compacto, que, ao resistir à deformação de forma acentuada, absorve mais energia dos que os demais arranjos cristalinos, influenciando, entre outras coisas, a resistência à fadiga da liga [4].

No caso de ligas de magnésio processadas por conformação mecânica, a resistência à fadiga é ainda mais potencializada, já que o processo tende a eliminar microporosidades e também melhorar consideravelmente o acabamento superficial, outro fator de relevância na resistência à fadiga [4].

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de algumas ligas de magnésio [5]

Liga (tratamento)	Propriedades Mecânicas		
	$\sigma_{esc}$ Tração (MPa)	$\sigma_{esc}$ Comp. (MPa)	Alongamento (%)
AZ31 extrudado	200	97	15,0
AZ31 fundido	105	38	21,0
AZ61 extrudado	180	115	14,0
AZ61 extrudado T6	230	130	12,0
AZ 80 extrudado	230	170	11,0
AZ80 extrudado T6	275	240	7,0

A tabela 1 exibe algumas propriedades mecânicas das ligas de magnésio mais comuns, com e sem tratamentos térmicos, originadas de diferentes processos de fabricação. Fica evidenciada a influência, sobretudo dos processos de manufatura, nas propriedades mecânicas das ligas de magnésio. O trabalho de Viehweger *et. al.* [6] mostra que há diferença no processamento a partir de matérias-primas recristalizadas e originadas de bruto de fusão, porém alterando parâmetros de processamento (velocidade de deformação e temperatura) é possível obter resultados semelhantes.

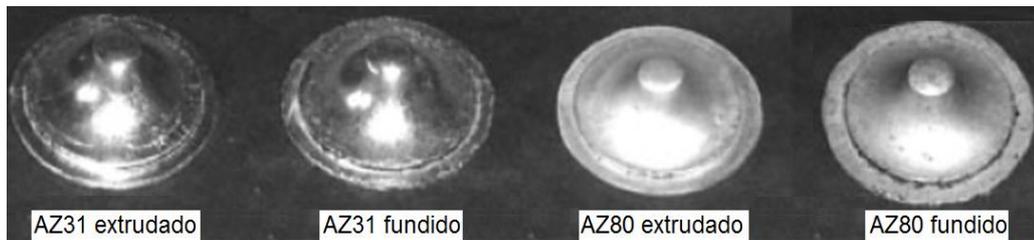


Figura 2 – Peças forjadas em ligas de magnésio em estado bruto de fusão e recristalizado por extrusão [6].

### 2.1.2 - Principais elementos presentes nas ligas de magnésio

Para se alterar as características do magnésio puro, alguns elementos de liga foram adicionados, para que propriedades mecânicas fossem melhoradas, como, por exemplo, resistência mecânica e módulo de elasticidade. A tabela 2 mostra uma relação dos principais componentes das ligas de magnésio e suas influências nas características finais da liga.

Tabela 2 - Principais elementos de ligas e seus efeitos em ligas de magnésio [4].

Elemento de liga	Efeitos
<b>Alumínio</b>	Desde os anos 20 o alumínio se tornou o principal elemento de liga por aumentar significativamente o limite de resistência através de formação da fase $Mg_{17}Al_{12}$ . Quando presentes em teores maiores que 6% em peso, torna a liga tratável termicamente, porém ligas comerciais dificilmente ultrapassam 10% de alumínio.

<b>Zinco</b>	É o segundo elemento mais importante para o magnésio. Usualmente utilizado em conjunto com o alumínio para aumentar a resistência à temperatura ambiente, entretanto, quando adicionado em teores acima de 1% em peso reduz a ductilidade a quente em ligas de magnésio contendo de 7 a 10% de alumínio.
<b>Terras Raras</b>	Terras raras aumentam a resistência à alta temperatura. Geram precipitados na região de contornos de grão aumentando a resistência à fluência. As ligas de magnésio com terras raras têm sido amplamente estudadas nos últimos anos visando o melhoramento das propriedades mecânicas em solicitações a altas temperaturas como materiais estruturais na indústria automobilística e aeroespacial.
<b>Prata</b>	Facilita o tratamento de envelhecimento.
<b>Tório</b>	Aumenta a resistência à fluência em temperaturas até 370°C e melhora a soldabilidade de ligas contendo zinco.
<b>Manganês</b>	Adições de manganês não afetam a resistência máxima, porém resulta um pequeno aumento da resistência de escoamento.
<b>Estanho</b>	Quando utilizado em conjunto com alumínio, aumenta a ductilidade da liga e facilita o forjamento, pois diminui a tendência a trincas a quente.

### 2.1.3 - Nomenclatura das Ligas de Magnésio

Como para a maioria dos materiais, que formam ligas metálicas, são atribuídas nomenclaturas oficiais para possibilitar sua padronização, também para as ligas de magnésio foram estabelecidas nomenclaturas oficiais. A mais utilizada é a proposta pela ASTM, em meados do século passado, formada por quatro caracteres: os dois primeiros são letras, as quais correspondem aos principais elementos químicos presentes, e os dois últimos são algarismos, que representam a quantidade percentual aproximada dos elementos presentes mais relevantes. A tabela 3 mostra a designação correspondente dos principais elementos de liga na nomenclatura das liga de magnésio.

Tabela 3 - Principais elementos de ligas e seus efeitos em ligas de magnésio

A: Alumínio	B: Bismuto	C: Cobre	D: Cádmi
E: Terras raras	F: Ferro	G: Magnésio	H: Tório
K: Zircônio	L: Lítio	M: Manganês	N: Níquel
P: Chumbo	Q: Prata	R: Cromo	S: Silício
T: Estanho	W: Ítrio	Y: Antimônio	Z: Zinco

No caso da liga de magnésio utilizada neste estudo, a liga AZ61, sua nomenclatura indica que esta se refere a uma liga onde os elementos mais representativos são alumínio, representado pela letra A, e o zinco representado pela letra Z. Os algarismos no final da designação indicam os teores de 6% para o alumínio e 1% para o zinco.

Junto à nomenclatura principal da liga, é comum aparecer mais caracteres, sendo estes representativos do estado de fornecimento do material, indicando a presença de tratamentos térmicos e mecânicos. A tabela 4 apresenta a nomenclatura dos estados de fornecimento das ligas de magnésio.

Tabela 4 - Designação dos estados de fornecimento das ligas de magnésio.

<b>Caracteres atribuídos</b>	<b>Estado de fornecimento</b>
F	Não Tratado
O	Recozido
H10 e H11	Levemente encruado
H23, H24 e H26	Encruado e parcialmente recozido
T4	Tratamento térmico de solubilização
T5	Envelhecimento artificialmente
T6	Tratamento térmico de solubilização e envelhecido artificialmente
T8	Tratamento térmico de solubilização, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente.

#### **2.1.4 - Microestruturas do magnésio e suas ligas**

Os materiais metálicos possuem a característica de se arranjamem em estruturas cristalinas bem definidas. Isso o difere dos materiais sólidos amorfos, que possuem um arranjo estrutural aleatório dos seus átomos, íons ou moléculas. Os metais, materiais cristalinos, possuem um arranjo repetitivo, periódico e tridimensional [7].

Essa repetição ao longo do material pode ser representada por uma estrutura mínima e única, chamada de “célula unitária”. Esse reticulado fornecerá grande parte

das características e propriedades do metal, em conjunto com os aspectos advindos dos processos de fabricação.

No presente momento são considerados catorze modelos diferentes de reticulados, que representam todos os metais cristalinos já estudados. Entre eles, os mais comumente encontrados são as estruturas cúbica de corpo centrado (CCC), cúbica de face centrada (CFC), e hexagonal compacta (HC). A tabela 5 são listados alguns metais e suas respectivas estruturas primárias:

Tabela 5 - Estrutura cristalina dos principais metais puros [8].

<b>Estrutura</b>	<b>Metal</b>
CFC	Ag, Al, Au, Ca, Co- $\beta$ , Cu, Fe- $\gamma$ , Ni, Pb, Pd, Pt, Rh, Sr
HC	Be, Cd, Co- $\alpha$ , Hf- $\alpha$ , Mg, Os, Re, Ru, Ti- $\alpha$ , Y, Zn, Zr- $\alpha$
CCC	Ba, Cr, Cs, Fe- $\alpha$ , Fe- $\delta$ , Hf- $\beta$ , K, Li, Mo, Na, Nb, Rb, Ta, Ti- $\beta$ , V, W, Zr- $\beta$

O magnésio, conforme pode se verificar na tabela 5, tem estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). Esta estrutura tem uma organização unitária da seguinte forma: as faces superior e inferior da célula unitária são compostas por seis átomos que formam hexágonos regulares e que se encontram em torno de um único átomo no centro. Um outro plano que fornece três átomos adicionais para a célula unitária está localizado entre os planos superior e inferior. Os átomos nesse plano intermediário possuem como vizinhos mais próximos os átomos em ambos os planos adjacentes [9]. A figura 3 apresenta a estrutura hexagonal compacta, base das ligas de magnésio.

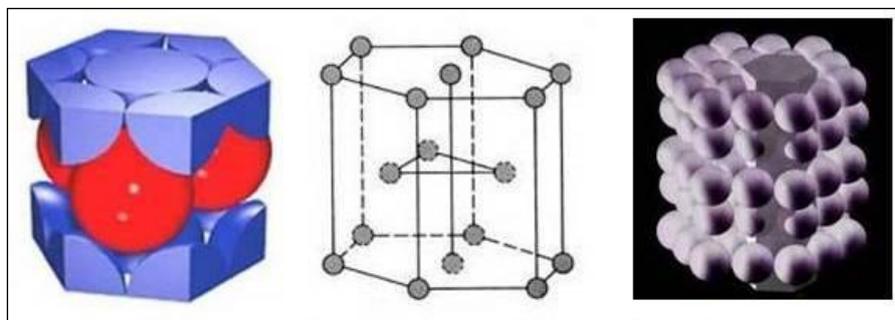


Figura 3 - Célula unitária da estrutura hexagonal compacta [34].

Em temperatura ambiente, esta estrutura cristalina possui poucos sistemas de escorregamento (3 ou 6). Por esse motivo, à baixas temperaturas, e possui pequena deformabilidade de outros sistemas. Porém, com o aumento da temperatura, ocorre a ativação dos planos de escorregamento, de modo que a deformabilidade do material aumenta consideravelmente. A temperatura de 225 °C é considerada como que atua nesses sistemas, para o magnésio puro [9-10]. A figura 4 apresenta os planos preferenciais de escorregamento da estrutura hexagonal compacta.

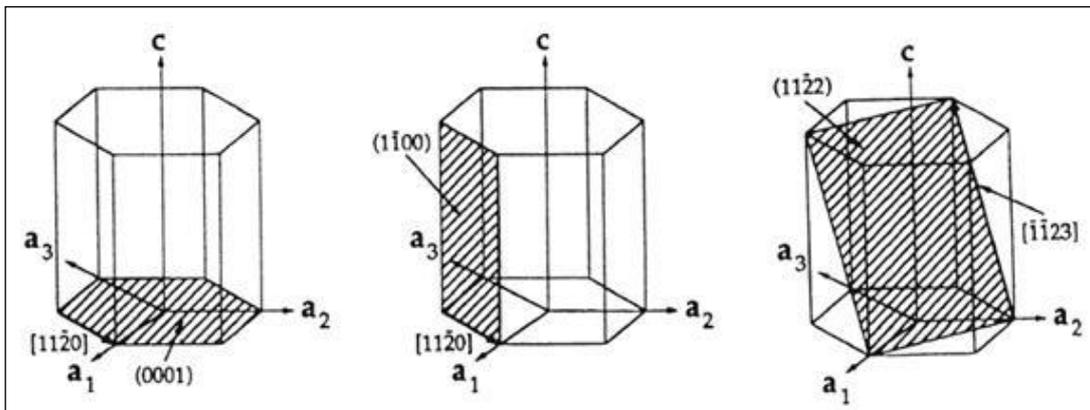


Figura 4 – Estrutura hexagonal compacta e seus planos principais de deslizamento [11].

## 2.2 - Liga de Magnésio AZ61

### 2.2.1 – Características

A liga de magnésio AZ61 é uma liga onde os principais elementos de liga são o alumínio e o zinco, em teores respectivos de 6% e 1%. Segundo a norma técnica UNS M11610, a composição química desta liga é a que se apresenta na tabela 6.

Tabela 6 - Composição química da liga AZ61 (UNS M11610)

<b>Elemento</b>	<b>Al</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>
% Min. (peso)	5,80	0,40	0,15	Restante
% Max. (peso)	7,20	1,50	0,50	Restante

A tabela 6 mostra que o alumínio é o elemento de liga com maior porcentagem no material e isso o torna o elemento mais significativo dessa composição, à exceção do próprio magnésio.

O alumínio é inserido na composição química desta liga metálica com o intuito de formar precipitados intermetálicos ( $Mg_{17}Al_{12}$ ), o que aumenta consideravelmente a resistência mecânica da liga. Tratamentos térmicos como o T6 são geralmente usados para acelerar a formação e distribuição destes precipitados.

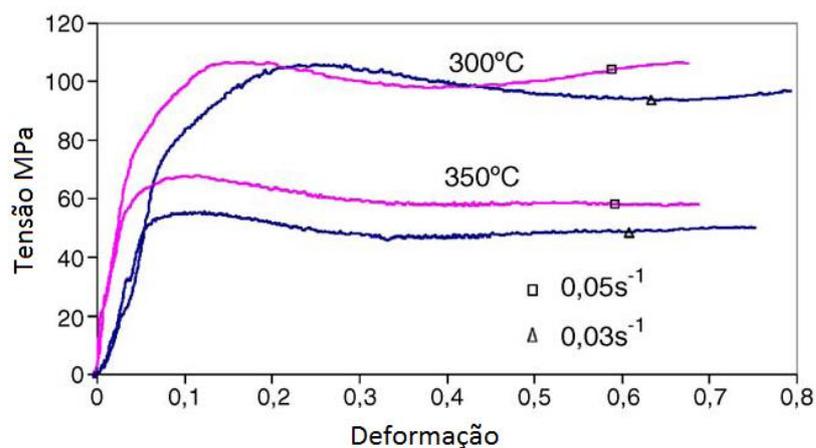
O segundo elemento de adição principal é o zinco. Nesta liga, sua adição é próxima de 1% e sua função é parecida com a do alumínio: aumentar a resistência mecânica através da formação de partículas de segunda fase. No entanto, ainda mais que os de alumínio, os precipitados ricos em zinco diminuem consideravelmente a ductilidade das ligas de magnésio.

Existem ainda outros elementos que podem ser adicionadas, como Terras Raras, Prata, Tório, Manganês, Cálcio e Estanho, cujos efeitos para a liga vão desde aumento de resistência mecânica até controle de solidificação primária, ainda na etapa de lingotamento (para posterior tratamento termo-mecânico) do metal.

Esta composição química proporciona que a liga tenha elevada deformabilidade a quente, o que a torna uma excelente alternativa para a conformação mecânica, aliando possibilidades de processamento com interessantes propriedades mecânicas após deformação.

Por outro lado, se deforma, as ligas de magnésio deve sempre considerar a velocidade de deformação aplicada no processo. Ligas de magnésio, inclusive a liga AZ61, possuem elevada sensibilidade à velocidade de deformação, aumentando consideravelmente a resistência ao escoamento quando se tem um pequeno incremento

de velocidades de deformação. A figura 5 mostra curvas de escoamento da liga de magnésio AZ61, com diferentes velocidades de deformação e temperaturas.



**Figura 5** - Curvas de escoamento da liga AZ61 em diferentes temperaturas e velocidades de deformação [12].

Pode-se observar na figura 4 a grande diferença que existe quando se altera minimamente a velocidade de deformação. Na velocidade de deformação de  $0,03 \text{ s}^{-1}$ , com uma temperatura de  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ , a tensão de escoamento da liga é de aproximadamente  $50 \text{ MPa}$ , enquanto que em velocidade de deformação de  $0,05 \text{ s}^{-1}$ , na mesma temperatura, a tensão de escoamento é de, aproximadamente,  $80 \text{ MPa}$ , ou seja, quase 60% maior. O mesmo efeito é verificado com temperaturas mais baixas, como a ilustrada no gráfico, a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

É comum que a liga de magnésio AZ61, após ser submetida à conformação, passe por um tratamento térmico, a fim de melhorar suas propriedades mecânicas. Assim, o usual é que seja realizada uma solubilização e envelhecimento, tendo em vista promover um endurecimento por precipitação. A tabela 7 mostra algumas propriedades da liga de magnésio AZ61, depois de passar por um envelhecimento (T5).

**Tabela 7** - Propriedades da liga AZ61 T5 [13]

<b>Dureza</b>	60 HB
<b>Tensão de escoamento em tração (temp. ambiente)</b>	180 MPa
<b>Tensão de escoamento em compressão (temp. ambiente)</b>	125 MPa
<b>Tensão de ruptura</b>	305 MPa

<b>Alongamento à temperatura ambiente</b>	16%
<b>Alongamento à temperatura de 315 °C</b>	70%
<b>Densidade</b>	1,8 g/cm <sup>3</sup>

### **2.3 - O Processo de Extrusão**

A extrusão é um processo de produção de componentes mecânicos de forma semicontínua, no qual uma força mecânica comprime o material, conduzindo este a escoar através de um orifício de uma matriz, recebendo a forma pré-determinada pela ferramenta.

A forma final da peça pode resultar em uma redução da área inicial, mantendo-se a forma, ou mesmo gerar perfis mais ou menos complexos, dependendo do processo empregado na produção. Como a geometria da matriz permanece inalterada, os produtos extrudados têm seção transversal constante.

A extrusão pode ser realizada a frio ou a quente. A seleção dependerá da magnitude da deformação que se pretende realizar e da maior ou menor ductilidade do metal a ser extrudado.

O processo de extrusão a frio é realizado a uma temperatura abaixo da temperatura de recristalização e ainda tem como característica uma redução não muito acentuada de dimensões e a necessidade de matrizes mais robustas e cintadas, para suportarem as grandes tensões impostas.

O processo de extrusão a quente é concebido em uma temperatura superior à de recristalização do material. Como é de consenso geral, deformabilidade é grandemente aumentada pelo aumento da temperatura, de modo que nos processos a quente, a complexidade das geometrias extrudadas, bem como o grau de redução são elevados.

Para o processo de extrusão é creditado as seguintes vantagens:

- É possível uma economia de material devido à eliminação das perdas, como no caso da usinagem, e também a eliminação de rebarbas.

- Excelentes propriedades mecânicas devido a uma microestrutura formada por uma fibragem contínua do material.

- Dimensões, forma e peso exatos, comparáveis aos acabamentos finais obtidos por usinagem.

- Possibilidade de uma produção semicontínua, com economia de tempo e com conseqüente aumento do rendimento, devido à coordenação e à combinação das várias etapas do processo.

Os materiais mais usados na extrusão são: alumínio, cobre, aço de baixo carbono, magnésio e chumbo, sendo este o primeiro metal a ser extrudado, ainda no final do século XIX [14]. Estes materiais extrudados dão origem a uma grande quantidade de produtos, incluindo-se quadros de janelas e portas, trilhos para portas deslizantes, tubos de várias seções transversais e formas arquitetônicas. A extrusão pode ser combinada com operações de forjamento, sendo neste caso denominada extrusão fria [15].

Em relação ao maquinário, a extrusão é convencionalmente realizada por prensas hidráulicas, onde o curso e a velocidade do processo podem ser controlados durante toda a produção, permitindo extrusões mais longas e/ou profundas.

Prensas excêntricas são também usadas para extrusão a frio e por impacto, e são indicadas para produção em série de pequenos componentes. Operações de múltiplos estágios, onde a área da seção transversal é progressivamente reduzida, são efetuadas em prensas especiais [15].

### **2.3.1 - Tipos de extrusão**

Os processos de extrusão são classicamente diferenciados de duas formas: extrusão direta e extrusão inversa.

### 2.3.1.1 - Extrusão direta

A extrusão direta tem como característica a aplicação da força no mesmo sentido do escoamento do material.

Na figura 6, pode se observar um esquema do processo de extrusão direta, onde o material é empurrado por um punção, através de uma abertura na matriz. A medida que o material vai atravessando a cavidade, vai tomando a forma do orifício.

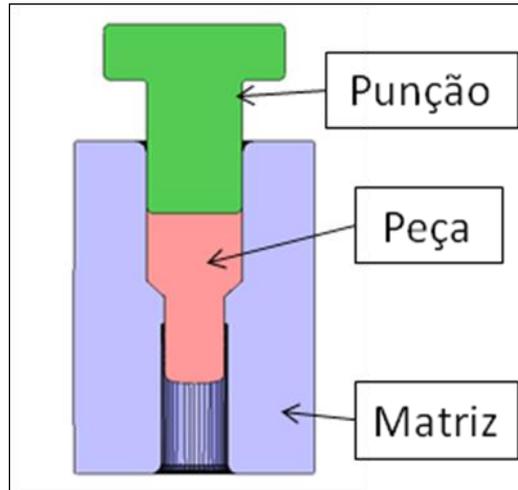


Figura 6 - Modelo esquemático da extrusão direta.

Nas matrizes de extrusão direta existem alguns fatores geométricos principais, os quais devem ser considerados para cálculos de processamento.

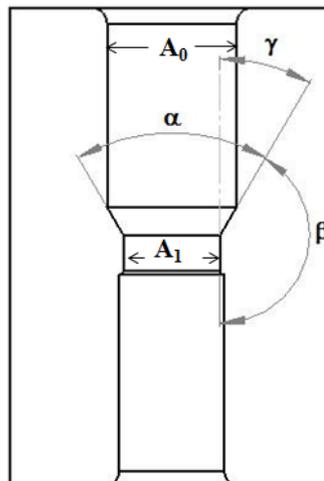


Figura 7 - Modelo esquemático de parâmetros da matriz.

Um desses fatores é o “ângulo de cone”, mostrado na figura 7 e representado neste estudo por  $\alpha$ , que tem como função facilitar a entrada do material e suavizar a redução de área inicial  $A_0$ , para a forma desejada  $A_1$ . A variação dessa redução de área é um fator que será estudado nesse trabalho.

Para base de cálculos, é possível definir várias relações matemáticas para o processo de extrusão direta. Para o presente estudo, foi utilizado a relação apresentada na equação 1, relativa ao cálculo de deformação verdadeira ( $\varphi$ ) [13]:

$$\varphi = \ln \frac{A_1}{A_0}$$

Equação 1

Onde:

$\varphi$  = deformação verdadeira em área (-);

$A_0$  = Área inicial (mm);

$A_1$  = Área final (mm).

Relativamente aos cálculos de força de extrusão, no processo direto, adota-se a equação (2) [15]:

$$F_{ext} = A_0 \cdot k_{fm} \cdot \varphi \cdot \left( 1 + \frac{2\mu}{\text{sen} 2\gamma} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma}{\varphi} \right) + \pi \cdot d_0 \cdot \mu \cdot k_{f0} \cdot h_k \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$F_{ext}$  = força de extrusão (N);

$A_0$  = Área inicial a ser extrudada (mm<sup>2</sup>);

$k_{fm}$  = Tensão de escoamento média (N/mm<sup>2</sup>);

$k_{f0}$  = Tensão de escoamento inicial (N/mm<sup>2</sup>);

$\varphi$  = Deformação em área (-);

$\mu$  = Coeficiente de atrito do par tribológico;

$\gamma$  = Semi-ângulo de cone (radianos);

$d_0$  = Diâmetro inicial da peça a ser extrudada (*blank*) (mm).

Os valores de velocidade de deformação média ( $\dot{\varphi}_{medio}$ ) podem ser obtidos através da seguinte formula [16]:

$$\dot{\varphi}_{medio} = \frac{6 V_F}{d_0} \ln \left( \frac{d_0}{d_1} \right)^2 \operatorname{tg}(\gamma + 90)$$

Equação 3

Onde:

$\dot{\varphi}_{medio}$  = Velocidade de deformação média (mm/s)

$V_F$  = Velocidade de ferramenta (mm/s)

$d_0$  = Diâmetro Inicial (mm)

$d_1$  = Diâmetro Final (mm)

$\gamma$  = Semiângulo de extrusão (radianos)

### 2.3.1.2 - Extrusão Indireta

A extrusão indireta se diferencia da direta pelo sentido de escoamento do material. Na variante inversa, ou indireta, a força aplicada atua no sentido oposto ao

escoamento do material. Uma das vantagens desse processo em relação ao anterior é que o material não se movimenta dentro da matriz, assim o atrito causado por esse movimento não existe, diminuindo muito a força necessária para a realização do processo. Em contra partida esse processo que fica basicamente em torno do punção, que é uma ferramenta vazada, restringe a força de processamento e também a extrusão de grandes geometrias que necessitam que o punção tenha um grande comprimento.

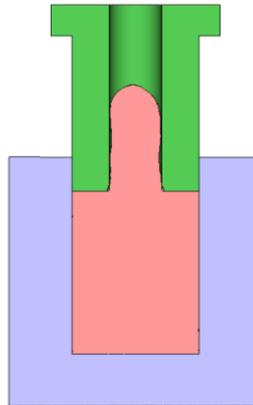


Figura 8 - Modelo esquemático da extrusão indireta

Na extrusão indireta é possível utilizar uma equação semelhante à da extrusão direta, quando se deseja calcular a deformação verdadeira do processo. Devido à seção inicial do material onde atua a força (área do punção), ser a mesma seção que ocorre no final da deformação. A deformação é calculada pela relação das alturas, conforme apresentada na equação (4) [13] ou através da deformação em área mostrada na equação (1).

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\varphi$  = deformação verdadeira (-);

$h_0$  = altura inicial (mm);

$h_1$  = altura final (mm).

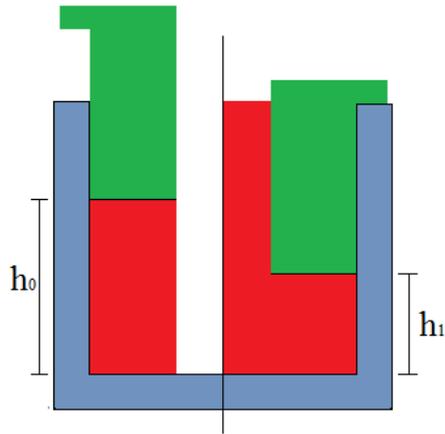


Figura 9 - Modelo representando altura inicial ( $h_0$ ) e altura final ( $h_1$ ).

Para o dimensionamento matemático das forças de extrusão, devido ao atrito relativo entre punção e material ser nulo, utiliza-se uma fórmula simplificada, apresentada pela equação (5) [15]:

$$F = \frac{A_0 * k_{fm} * \varphi}{\eta_F}$$

Equação 5

Onde:

F= força (N);

$k_{fm}$  = tensão de escoamento média ( $N/mm^2$ );

$\varphi$  = deformação verdadeira em área (-);

$\eta_F$  = fator de rendimento do processo, normalmente atribuído o valor de 0,9.

O fator de rendimento utilizado anteriormente foram previamente calculados e tabelados devido à complexidade das matrizes, e grau de deformação.

### 2.3.2 - Parâmetros e fatores relevantes no processo de extrusão

O processo de extrusão é relativamente simples. Entretanto, existem algumas variáveis associadas ao processo, que são de grande relevância para a extrusão, sendo possível citar algumas: razão de extrusão, geometria da matriz, velocidade de extrusão, lubrificação e material a ser extrudado.

A razão de extrusão (R) corresponde à relação entre a área inicial e final do *billet*, que influenciará diretamente a força do processo.

A geometria da matriz causará impacto devido aos possíveis ângulos e raios presentes na matriz. Essas singularidades das matrizes afetarão a distribuição de deformações e tensões de escoamento efetivas na zona de deformação. No caso de uma matriz com um ângulo de cone grande, maior será o volume de material que sofrerá cisalhamento, resultando em um aumento da porção de força referente à deformação heterogênea, em virtude do cisalhamento interno.

Por outro lado, a matriz diminui de comprimento, causando uma diminuição na força referente ao atrito entre o material e as paredes cônicas da ferramenta. Com isso é possível deduzir que existe um ângulo de cone ótimo, favorável para a diminuição das forças no processo. A força de atrito também pode ser influenciada pela lubrificação, que atua na interface peça-matriz.

Ainda em relação às propriedades dos processos, a velocidade de extrusão, dependendo de sua intensidade, interfere no calor gerado devido à deformação. Este fator é ainda mais significativo em processamento de materiais com planos de escorregamento termicamente ativados, como o caso das ligas de magnésio.

Das variáveis referentes ao material, destaca-se principalmente as tensões de escoamento relativas a cada liga metálica a extrudar. Isso porque essa propriedade tem grande sensibilidade às alterações de processos. Sendo assim, cada alteração feita no processo pode acarretar em uma grande diferença nos resultados alcançados após a extrusão.

## **2.4 - Extrusão de Ligas de Magnésio**

Como visto anteriormente, as ligas de magnésio possuem propriedades como baixa densidade, excelente usinabilidade, uma boa resistência mecânica entre outras, que possibilitam este material de alcançar uma maior participação em projetos automobilísticos e aeroespaciais.

Atualmente, a maior parte das ligas de magnésio são fabricadas por fundição. Porém, as pesquisas dos processos termomecânicos vêm se ocupando com o aumento das propriedades mecânicas e das possibilidades geométricas de peças. A extrusão é um exemplo de processo mecânico que vem sendo estudado para ampliar a quantidade de aplicações deste material, com o aumento da plasticidade e da resistência mecânica pós-processamento.

As principais dificuldades para esse processo são as temperaturas de processamento e a relação desta com a velocidade de deformação imposta. Fatores ainda não otimizados dizem respeito a projetos de ferramental, sendo que não se tem atualmente uma tradição em extrusão de ligas de magnésio. Indicativos de ângulos ideais, especificamente para ligas de magnésio, não são encontrados em livros e artigos.

De mesma forma, não se tem total certeza sobre os limites de deformabilidade destes materiais, os quais notoriamente são afetados por pequenas variações de parâmetros de processo.

De maneira geral, as pesquisas têm se fundamentado na obtenção de superplasticidade das ligas de magnésio, sendo esta característica conseguida com o severo refino de grão do material.

Pesquisas sobre extrusão de ligas de magnésio têm sido realizadas ao redor do mundo, com objetivos muito variados. Alguns trabalhos mostram relevantes resultados, como Swiostek *et. al.* [17] que extrudou ligas de magnésio da família AZ (AZ31, AZ61 e AZ80) em baixas temperaturas. Os pesquisadores constataram que abaixo de 200 °C o processo é inviável, pois necessitaria de uma velocidade de deformação extremamente baixa, para compensar a falta de temperatura e evitar a formação de trincas. Estes parâmetros de processo indicam uma baixa taxa de produção, o que, na prática, impede a produção industrial de grandes séries. Por outro lado, esta baixa temperatura, com baixa velocidade de deformação, gera um grão extremamente encruado que, aliado a um

eficiente controle de recristalização, induziria ao material elevada resistência mecânica, similar aos aços estruturais.

Na mesma linha está o trabalho de Bussiba *et. al.* [18], que extrudou as ligas de magnésio AZ31 e ZK60 em temperaturas baixas (127 °C) e velocidade de deformação de  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e constatou a tendência ao surgimento de microtrincas intergranulares em materiais com heterogeneidades de granulação. Como solução, os pesquisadores sugerem a utilização de extrusão angular (ECAP) para preparar o material de forma homogênea, para posteriores extrusões em baixas temperaturas e baixas velocidades de deformação.

A extrusão angular foi utilizada em vários estudos de Figueiredo *et.al.* com o objetivo de se produzir um refino de estrutura granular das ligas de magnésio, aumentando a ductilidade das ligas em temperaturas relativamente baixas [19-20]. Estas pesquisas apontam que as ligas de magnésio possuem características diferentes das dos materiais com estrutura CFC ou CCC, em termos de refino de grão. Enquanto que um único passo de extrusão com deformação severa é suficiente para alinhar e orientar grãos alongados de materiais como alumínio e cobre, no caso de ligas de magnésio são necessários mais passes, já que a recristalização dinâmica nessas ligas é muito presente, gerando, facilmente, estruturas heterogêneas em termos de morfologia (alongados e equiaxiais) e tamanho de grão [20].

O processo de extrusão também foi utilizado por Chen *et. al.* na deformação de uma liga de magnésio AZ91D. Esta liga tem composição típica de produtos fundidos de magnésio, de modo que sua ductilidade é praticamente nula em temperatura ambiente e sua deformabilidade é reduzida, ainda que em temperaturas elevadas. Pelo processamento adotado, a liga deformada resultante apresentou granulometria refinada, o que aumentou consideravelmente a resistência mecânica e o escoamento da liga adotada para o estudo [21].

No trabalho de Shahzad e Wagner [22] é estudado o efeito de resistência diferencial (*strength differential effect - SDE*) que as ligas de magnésio extrudadas apresentam, no que diz respeito às diferenças nas resistências ao escoamento de ligas de magnésio quando submetidas a esforços de tração e compressão. Estes pesquisadores alemães perceberam que uma alta razão de extrusão provoca aumento na velocidade de

extrusão e, conseqüentemente, gera aumento na temperatura do sistema. Este aumento na temperatura provoca crescimento de grão do material e evidenciaram, por difração de raio-X (DRX) que durante a extrusão se forma um tipo fibroso de textura cristalográfica, o que resulta em anisotropia da tensão de escoamento sob tensão e compressão. Por fim, concluíram que o impacto da SDE enfraquece se for diminuída a temperatura de extrusão, embora continua a ser afetado pelas variações na razão de extrusão [22].

## **2.5 - Tratamento Térmico de Ligas Metálicas**

Em geral, para as ligas metálicas, os tratamentos térmicos possuem a finalidade de alterar as propriedades mecânicas e/ou características intrínsecas do material. Para o magnésio e suas ligas esses tratamentos também são normalmente utilizados para esse fim. Desta forma, torna-se possível utilizar um material em um dado processo, mesmo que originalmente este material não possua características próprias para a aplicação desejada.

Os tratamentos térmicos possuem como principais fatores o tempo e a temperatura de exposição do processo. O tempo de tratamento térmico geralmente é influenciado pela geometria da peça que, dependendo de seu tamanho, espessura, e largura, influenciará no tempo mais adequado para que o processo seja efetivo. A temperatura está ligada à composição química da liga, que influenciará na microestrutura resultante do tratamento. As alterações estruturais experimentadas pelo metal tratado são responsáveis pelas modificações das propriedades objetivadas dos materiais.

As características finais desejadas nos metais após o tratamento é que serão responsáveis pela escolha do tratamento térmico mais indicado para tal finalidade. Se o objetivo é que, após o tratamento térmico, a liga tenha um aumento em suas propriedades mecânicas (como aumento da resistência mecânica, aumento da dureza), comumente são indicados os processos de solubilização e envelhecimento no caso de ligas não ferrosas. Caso contrário, quando o tratamento tem como finalidade facilitar um

futuro processamento do material, pode ser aplicado na liga tratamentos térmicos como o alívio de tensões e o recozimento, por exemplo [23].

### **2.5.1 - Tratamentos térmicos das ligas de magnésio da família AZ**

Os tratamentos térmicos para as ligas de magnésio seguem os princípios das demais ligas metálicas, os quais foram descritos anteriormente. Sendo assim, é possível aplicar ao magnésio e suas ligas os mesmos tratamentos térmicos normalmente utilizados para outros metais, porém sempre fazendo os ajustes que respeitam as características de cada material.

Os tratamentos para as ligas de magnésio serão descritos posteriormente com suas nomenclaturas e suas atribuições. Habitualmente, vêm sendo utilizados nesses termos para pesquisas e pela própria indústria [23]. São eles:

Tratamento Térmico de Solubilização (T4) - Este tratamento consiste em solubilizar os elementos de liga na matriz do magnésio, resfriando-se rapidamente na sequência. Este procedimento provoca um aumento da resistência à tração, da ductilidade e da resistência ao impacto, porém diminui ligeiramente a tensão de escoamento e a dureza do material. Como não é realizado um envelhecimento artificial subsequente à solubilização, espera-se que a liga tenha um envelhecimento natural ao longo do tempo posterior ao tratamento térmico imposto. Para as ligas de magnésio, geralmente são utilizados aquecimentos na faixa de 340 °C a 565 °C, dependendo de cada liga. O tempo e temperatura dependerão do resultado desejado.

Tratamento Térmico de Envelhecimento (T5) – Este tratamento térmico consiste em envelhecer artificialmente um material já deformado a quente. É utilizado, portanto, após as peças sofrerem processos de conformação mecânica em altas temperaturas, como extrusão ou forjamento. Este tratamento origina um aumento da tensão de escoamento e da dureza da liga. As temperaturas indicadas para o envelhecimento artificial variam de 120 °C a 230 °C. O tempo e temperatura dependerão do resultado desejado.

Tratamento Térmico de solubilização seguido de um Envelhecimento (T6) - Este tratamento térmico une os tratamentos T4 e T5, ou seja, a peça é inicialmente deformada a quente, na sequência a mesma é aquecida para dissolver os elementos de liga no interior da matriz metálica do magnésio, onde permanece por um período grande de tempo – não inferior à horas - sendo, então, resfriada rapidamente até temperatura ambiente para solubilização dos elementos químicos. Posteriormente, as peças solubilizadas são novamente elevadas à temperaturas moderadas, onde permanecem por longos tempos de forno, promovendo a precipitação de particulados de segunda fase finamente dispersos. Nas ligas de magnésio da família AZ, estes precipitados são chamados de fase  $\beta$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ). Este tratamento térmico origina um aumento considerável da tensão de escoamento e da dureza da liga, no entanto diminui a resistência ao impacto e a ductilidade.

Tratamento Térmico de Solubilização seguido de Estabilização (T7) – Este tratamento térmico promove uma solubilização seguida de superenvelhecimento na liga metálica. Tem como principal objetivo a obtenção do máximo alívio de tensões e da mínima dilatação que as peças apresentam, quando sujeitas a elevadas temperaturas. Para ligas de magnésio, é pouco recomendado, já que os períodos longos de exposição de temperatura são prejudiciais devido à ativação de mecanismos complexos de oxidação, da qual liga é susceptível.

Em relação a periculosidade dos tratamentos térmicos de magnésio e suas ligas é importante ressaltar a característica de inflamabilidade do magnésio. De fato, todos os tratamentos propostos para o magnésio e suas ligas nunca atingem a temperatura de fusão (em torno de  $600^{\circ} C$  para ligas deformáveis), porém convém advertir que, quando se deseja realizar um processo termomecânico, os sensores de controle de temperatura devem estar em perfeitas condições de funcionamento, além de que se deve dar preferência para fornos com circulação forçada de ar, evitando-se assim, gradientes de temperatura [23].

Para as ligas de magnésio da família AZ, ou seja, as ligas enriquecidas com teores de alumínio e zinco, o efeito endurecedor do tratamento térmico é função principalmente da precipitação da fase  $\beta$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ), de modo que teores maiores de alumínio tendem a tornar mais efetivo os tratamentos térmicos impostos [23].

Desta maneira, a liga AZ31, com aproximadamente 3% de alumínio e menos de 1% de zinco, tem pouca ou nenhuma efetividade no tratamento térmico, no sentido de aumento de dureza e resistência mecânica. Para essa liga, os tratamentos térmicos têm a função de recozer o material, em sua maioria constituído de chapas planas, objetivando futuras aplicações de conformação mecânica – puncionamento, corte, dobra e pequenas estampagens. Por outro lado, é consensual a efetividade dos tratamentos térmicos para ganho de propriedades mecânicas na liga AZ80, com aproximadamente 8% de alumínio, em peso [23].

Teores ainda maiores de alumínio são encontrados apenas em ligas para fundição, como é o caso da liga mais comum para essa finalidade, a AZ91, onde os teores de alumínio frequentemente ultrapassam os 10%, em peso. Nestas ligas, a precipitação de fases duras é tão acentuada, que a deformabilidade em temperatura ambiente é praticamente nula e, mesmo em temperaturas mais elevadas, esta liga tem pequena ductilidade [23].

No meio termo se situa a liga de estudo deste trabalho, a AZ61, com 6% de alumínio e menos de 1% de zinco, em peso, aproximadamente. Para esta liga, a bibliografia é duvidosa e contraditória, no que tange a este assunto. Algumas fontes indicam tratamento térmico, visando o endurecimento e ganho de resistência mecânica e ao escoamento, enquanto outras admitem a ineficácia de tratamentos térmicos para o endurecimento desta liga.

O *ASM Metals Handbook* indica como tratamento térmico para a liga AZ61 o T5, onde, após a deformação imposta pelo processo de fabricação, a peça é submetida a um envelhecimento artificial em forno, a uma temperatura de 180 °C, durante um período de 16 horas [23].

Por outro lado, existem estudos que afirmam a ineficiência dos tratamentos térmicos para a liga AZ61, no sentido de incrementar a resistência mecânica e a dureza desta liga. Em seus trabalhos, os pesquisadores não obtiveram o resultado esperado após terem suas amostras tratadas termicamente.

Um dos estudos mostra que a liga de magnésio AZ61, após ser sujeitada a tratamentos térmicos T5 (18 horas em temperatura de 170 °C) e T6 (24 horas em 420°C,

resfriamento em água e, na sequência, 18 horas em temperatura de 170 °C), não obteve os resultados esperados em termos de aumento de propriedades mecânicas, resultando em valores iguais aos já obtidos antes do tratamento térmico [24].

Outro trabalho, obteve as mesmas conclusões, encontrou resultados piores para peças conformadas e tratadas termicamente com T4 (6 horas em 400 °C, resfriamento em ar forçado), em comparação com as peças apenas conformadas mecanicamente, sem qualquer tratamento térmico [25].

Em virtude das divergências da bibliografia, uma das incógnitas que este trabalho pretende contribuir é justamente a efetividade ou não do tratamento térmico em peças conformadas mecanicamente da liga de magnésio AZ61.

## **2.6 - Simulação Computacional em Processo de Conformação Mecânica**

O início da utilização da simulação computacional para conformação mecânica se deu na década de 60. Com a simulação é possível descrever e obter vários resultados que podem ser utilizados para a caracterização de processo. A simulação responde aquelas questões iniciais que ecoam em quem trabalha na indústria quando se pretende alterar o processo, como preenchimento total das cavidades das matrizes ou força necessária para realizar o processo. Outros resultados de cunho mais aprofundados como tensões, grau de deformação, probabilidade de fratura, previsão de microestrutura, entre outros, possibilitam um estudo detalhado da conformação. Sendo assim, há uma otimização dos processos de conformação, eliminando prática de tentativa e erro que ainda é praticado, por alguns conformadores.

Para simulação de grandes deformações são inúmeras as possibilidades de formulações com elementos finitos. Por outro lado, existem aspectos básicos que são pertencentes a todos as linhas de raciocínio.

Uma divisão bastante didática das etapas da simulação foi apresentada por Santos [26]. Primeiramente há a *Discretização do problema*, que consiste na divisão do

volume da peça cuja deformação pretende-se analisar em um número finito de volumes, denominados elementos (ver figura 10). Dessa forma, a análise, anteriormente contínua no volume da peça, passa a ser realizada em pequenos volumes (elementos). Os elementos são representados por nós, conectados entre si por segmentos de linhas. Elementos adjacentes compartilham os mesmos nós e também os mesmos lados.

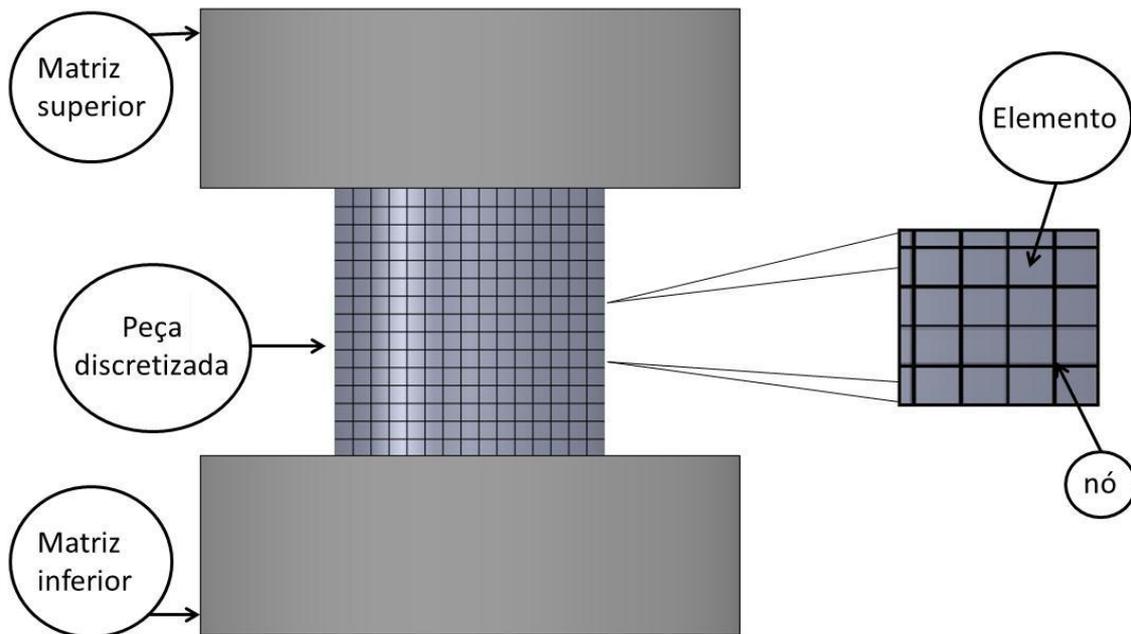


Figura 10 - Ilustração da discretização da peça para a realização da simulação [26].

Em seguida acontece a *Definição e resolução numérica da equação global de rigidez*, que fornece os dados necessários para obtenção dos resultados de deformação e tensão. Isso é feito através de aplicação das equações globais, sendo elas: Equações de equilíbrio, critérios de escoamento, equações constitutivas, condições de compatibilidade, para cada elemento.

O terceiro passo é a *Alteração da geometria da peça*, onde cada nó muda de posição em relação aos demais em função dos resultados da resolução da equação global de rigidez (ver figura 11).

Finalizando com os *cálculos dos componentes da velocidade de deformação, da deformação efetiva e das tensões em cada elemento*, que são feitos através de

formulações onde cada nó é analisado em relação à posição que se encontrava anteriormente.

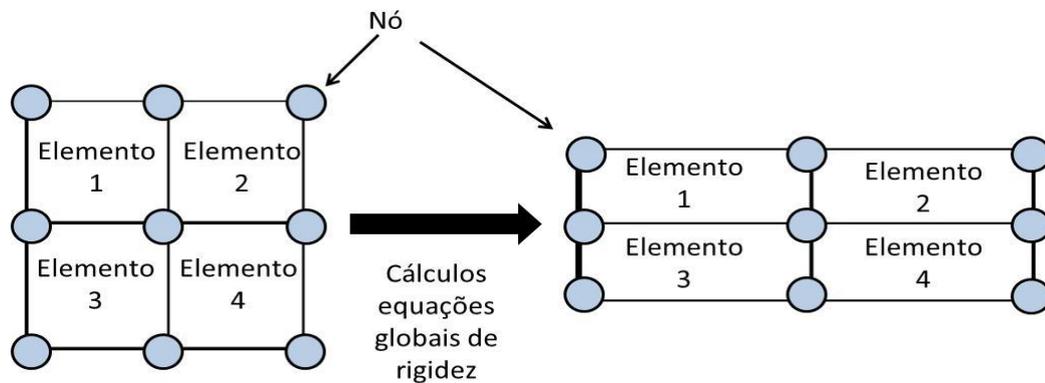


Figura 11 - Exemplificação da mudança de geometria após a realização dos cálculos globais [26].

No entanto, a simulação computacional tem como grandes limitadores, por um lado o alto custo dos *softwares* de simulação e por outro, a confiabilidade dos dados de entrada no programa computacional [27].

No que se reporta à confiabilidade dos dados de entrada, sobretudo dos materiais, vários parâmetros podem servir como fonte de erros, sendo o principal dado a curva de escoamento do material [28].

Ainda assim, não é possível se desprezar os erros associados aos outros dados dos materiais, como densidade, calor específico e condutividade térmica, além de propriedades mecânicas, módulo de Young e coeficiente de Poisson [30]. As condições do processo também são relevantes em uma simulação numérica computacional, de modo que se faz necessária também uma correta descrição dos efeitos do atrito e da transferência de calor entre *billet* e matriz [29].

Problemas de montagem da simulação são comuns, como a correta inserção de dados do contato da peça na matriz, definição de remalhamento, sobretudo quando se simulam processos que envolvem grandes deformações, mudanças nas propriedades mecânicas dos metais, geração de calor por deformação e perdas térmicas da peça para a matriz e ambiente [30].

## **3 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

### **3.1 – Matéria-prima**

A matéria-prima empregada para o estudo foi uma liga de magnésio AZ61, fornecida em barras cilíndricas, de diâmetro 31,5mm e comprimento de 6m. Este material tem origem alemã e foi obtido por doação do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – INEGI, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, em Portugal.

A presente pesquisa está inserida em um projeto de cooperação bilateral entre o LdTM/UFRGS e o INEGI/FEUP, de modo que a caracterização mecânica e microestrutural da matéria-prima foi realizada naquele instituto português, por pesquisador do Grupo de Estudos em Forjamento do LdTM.

A composição química da liga foi obtida através do certificado de garantia do fornecedor e seu valor foi admitido como real, já que não se dispunham de equipamentos naquela universidade para determinação de ligas não ferrosas desta natureza.

A caracterização microestrutural da liga foi realizada por meio de microscopia ótica, com as amostras retiradas no sentido longitudinal da barra escolhida para o estudo. As amostras passaram por um procedimento de lixamento com sequência de lixas d'água e polimento em alumina de granulometria de 1  $\mu\text{m}$ , seguidas de ataque com reagente HF, em concentração de 0,5% e diluído em etanol, conforme norma.

A matéria-prima também foi submetida a ensaio de dureza Brinell empregando-se uma esfera de 2,5mm e carga de 62,5kg, além de ensaios de resistência à compressão, que foram realizados em uma máquina universal de ensaios, marca MTS, com uma velocidade de deslocamento de cabeçote de 1mm/min. Os corpos-de-prova foram usinados com diâmetro de 20mm e altura também de 20mm, baseado em norma internacional ASTM E9 – 89a (2000). Foram submetidos à este ensaio um total de 5

amostras. A média simples entre estes valores caracterizou as propriedades mecânicas da liga de magnésio AZ61 submetida à compressão.

### 3.2 - Procedimentos do Processo de Extrusão.

Conforme já descrito, o objetivo principal deste trabalho foi verificar as diferenças nas propriedades mecânicas e na microestrutura de uma liga de magnésio AZ61 após extrusão direta em matrizes com três diferentes ângulos de cone.

Para isso, partiu-se de uma matéria-prima no estado recristalizado (comumente utilizados na conformação) e, após as extrusões, parte das peças ainda foram termicamente tratadas.

Para determinação da geometria de matriz optou-se pela simulação numérica computacional como ferramenta auxiliar. Foram simulados vários ângulos de cone e confrontados com diferentes níveis de deformação relativa em área.

A partir dos resultados de simulação, optou-se por fixar apenas uma deformação de extrusão e variar os ângulos de entrada, de forma que ficou estabelecido que a redução de área estudada seria de 40%, com os ângulos de cone variando em 30°, 60° e 90°. Essas diferenças de ferramental podem ser vistas na figura 12, onde as três matrizes apresentam o mesmo diâmetro de saída e apenas se diferenciam pelo ângulo de cone do material.

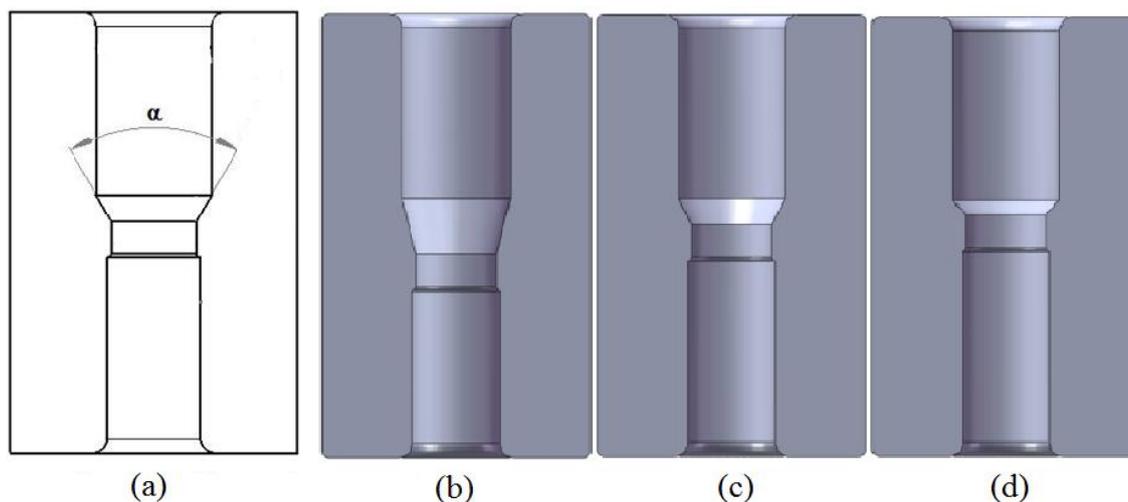


Figura 12 – (a) Ângulo de cone estudado ( $\alpha$ ). Comparação entre os modelos sólidos das matrizes de extrusão com diferentes ângulos de cone ( $\alpha$ ). (b) 30°, (c) 60°, (d) 90°.

As formas gerais das matrizes de extrusão foram utilizadas de acordo com o usual das práticas industriais deste processo, em que basicamente se tem um canal de entrada de diâmetro próximo ao do diâmetro do *billet*, seguido de uma região cônica, com uma dada angulação, que leva a um canal reto paralelo, com o diâmetro final desejado. Por fim, após este canal reto, existe um canal de saída, com um diâmetro levemente aumentado, a fim de aliviar as tensões compressivas radiais que o material é submetido.

O diâmetro do canal de entrada da matriz foi projetado com  $16 \pm 0,05\text{mm}$ , enquanto que o diâmetro do canal reto foi de  $12 \pm 0,05\text{mm}$ , de modo a se alcançar uma deformação relativa, em área, de aproximadamente 40%. A angulação do cone que leva o material ao canal reto foi variada. A figura 13, que ilustra o modelo das ferramentas, utilizadas todas as dimensões estão em milímetros. Todas as dimensões foram estabelecidas uma tolerância de  $\pm 0,05\text{ mm}$ .

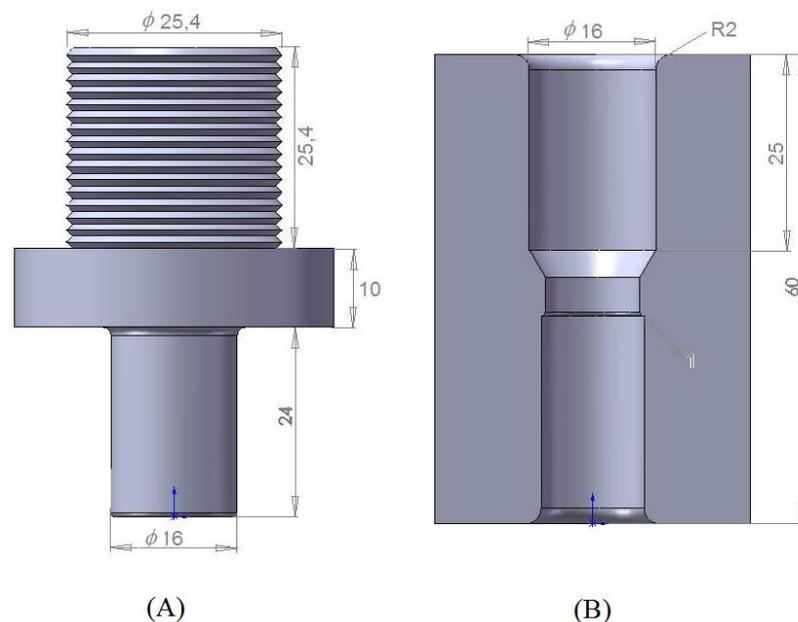


Figura 13 - Dimensões fixas para o punção e matrizes. (A) Punção. (B) Matrizes.

O material a ser deformado entra nesta ferramenta e é pressionado por um punção, de modo que é forçado mecanicamente a escoar por meio do cone e adquirir o diâmetro final, igual ao diâmetro do canal reto. Neste estudo, o punção adotado foi único para as três matrizes e teve seção transversal reta e circular, de diâmetro  $15,9 \pm$

0,05mm. O curso foi projetado de modo que os *billets* restassem com apenas 1mm de altura não deformada, ou seja, com o diâmetro inicial.

A partir da configuração estabelecida, fabricou-se as ferramentas em aço ferramenta H13, e também dos *billets* da liga de magnésio AZ61. Os *billets* foram projetados com geometria cilíndrica de diâmetro de 15,95 mm e comprimento de 20 mm. Ao total foram produzidos trinta *billets*, vinte e quatro para ensaios e seis para possíveis contraprovas.

Os vinte e quatro *billets* foram separados após as extrusões realizadas, de modo a formar dois grupos de doze peças, onde um grupo passou por tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento artificial (T6), e outro não. Dentro de cada grupo de doze peças, ainda foram divididos em três sub-grupos de quatro peças, sendo um grupo para cada matriz. A figura 14 mostra mais detalhadamente essas divisões.

Como o magnésio e suas ligas necessitam de temperatura para ativar seus planos de escorregamento e assim aumentar as possibilidades de conformação mecânica, foi estipulado que nesse estudo seria utilizada a temperatura de 400 °C para o processo, respeitando a faixa de trabalho do material (200°C até em torno de 600°C). Temperaturas superiores a 400 °C não são bem aceitas, devido a problemas de corrosão a que estas ligas são sujeitas [31].

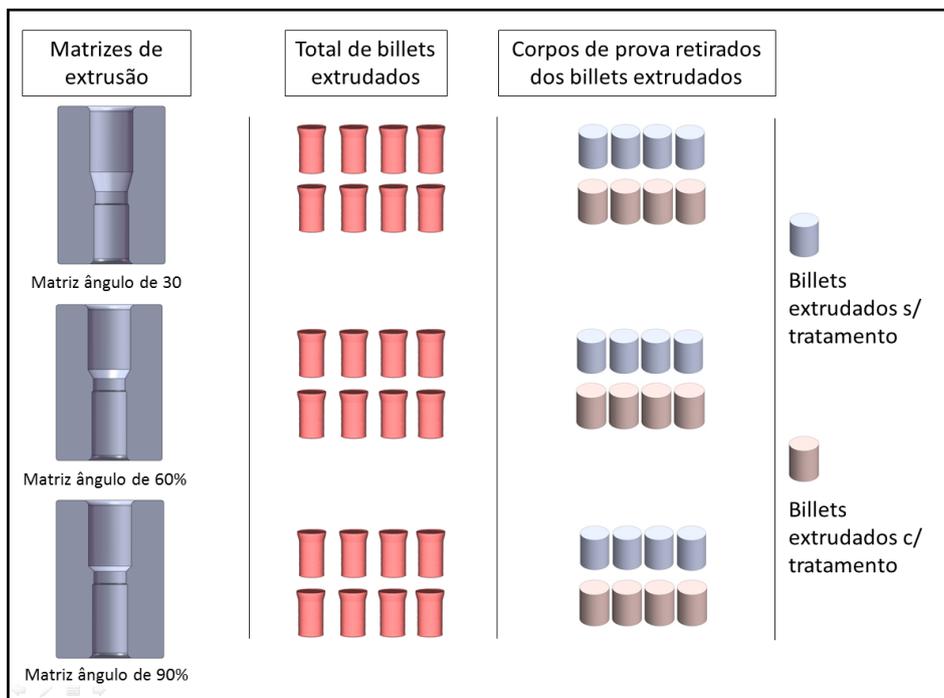


Figura 14 - Esquema gráfico da distribuição e destinação dos *billets* a serem analisados.

O forno empregado para aquecimento foi da marca SANCHIS<sup>®</sup>, de funcionamento elétrico, através de resistências aquecidas. No interior deste equipamento, todo o sistema (*billet* já posicionado nas ferramentas) foi aquecido em conjunto, para se evitar perdas de temperatura do material.

Termopares do próprio forno monitoraram a temperatura interna, além de termopares móveis, colocados próximos ao sistema ferramentas-material, monitorando a temperatura naquele local específico. Este termopar móvel foi utilizado para cotar gradientes de temperatura no interior da câmara do forno, já que não se dispunha de um forno com circulador de ar naquele momento. Quando a temperatura do forno atingiu os 400 °C, um período de 40 minutos foi adotado para a homogeneização térmica de todo o sistema.

É importante ressaltar que os billets inseridos no interior das ferramentas já haviam sido preliminarmente lubrificados. Neste trabalho, foi utilizado o lubrificante de nome comercial ROCOL<sup>®</sup> METALFLO 745, o qual consiste em uma dispersão aquosa de grafite microfino, contendo um ligante inorgânico, que tem como função facilitar o escoamento da liga de magnésio, diminuindo o atrito com a ferramenta. Na figura 15 é apresentado o sistema montado para o aquecimento.

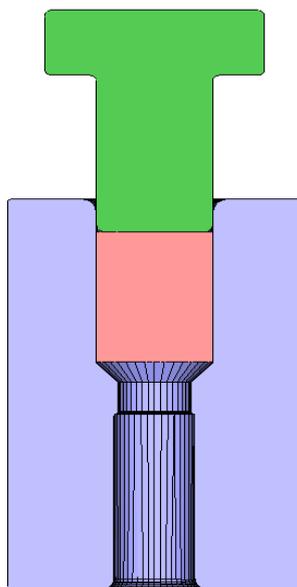


Figura 15 - Sistema (*billet* – ferramentas) que é levado ao forno para aquecimento e posterior extrusão.

Logo após a homogeneização da temperatura, os processos de extrusão foram realizados em uma prensa hidráulica, marca EKA. Essa prensa tem a capacidade de 400 kN e velocidade de ferramenta de 6 mm/s.

Cada aquecimento e extrusão foi realizado individualmente, de modo que o procedimento de aquecimento e extrusão foi repetido vinte quatro vezes, com ferramentais alternados, para suprir os mesmos vinte quatro *billets* extrudados.

Para a aquisição dos dados durante o processo de extrusão, a prensa utilizada foi instrumentada. Uma célula de carga foi calibrada e instalada na base da prensa, a fim de se medir os dados relativos à carga imposta na extrusão. Paralelamente, um *LVDT* foi fixado nas colunas da máquina, a fim de se monitorar o deslocamento e velocidade da corredeira (mesa superior) da prensa.

Estes sensores foram acoplados em um sistema de aquisição de sinal modelo *Spider*<sup>®</sup>, com 8 canais de entrada de dados, e então transmitidos a um computador portátil, onde o tratamento deste sinal foi feito através do software *Catman*<sup>®</sup>, instalado na máquina. Desta maneira, foi possível coletar os dados que originaram os gráficos que relacionam deslocamento, força e tempo, durante os procedimentos experimentais de extrusão.

Posteriormente às extrusões realizadas, quatro peças extrudadas em cada uma das três ferramentas foram separadas e deu-se início ao tratamento térmico T6. As outras quatro peças de cada matriz foram caracterizadas posteriormente em seu estado apenas deformado.

As peças tratadas termicamente foram aquecidas a 410 °C para a solubilização durante 24 horas e, em seguida, foram resfriadas em água. A segunda etapa trata-se do envelhecimento artificial, realizado à temperatura de 170 °C durante 16 horas, conforme indicado na bibliografia pesquisada [24]. Esse tratamento térmico foi realizado no forno *SANCHIS*<sup>®</sup>, o mesmo utilizado para o aquecimento pré-extrusão.

Por fim, as peças extrudadas, com e sem tratamento térmico, foram extraídos corpos-de-prova para ensaios de resistência à compressão, dureza e metalografia, retirados da região deformada, por meio de usinagem.

### **3.3 - Procedimentos de Análise das Peças Extrudadas**

### 3.3.1 - Ensaio de dureza

Para a medição de dureza foi utilizado o método criado por Brinell. O ensaio de dureza Brinell foi realizado com um equipamento da marca *Fortel* do modelo *MRS* (figura 16), onde foi utilizado um penetrador esférico com o diâmetro de 2,5mm e uma carga de 1838,75 N.

Foram realizadas três medições de dureza para cada uma das diferentes condições de extrusão e tratamento térmico estudadas, sendo a dureza caracterizada então pela média dos valores encontrados.



Figura 16 - Durômetro marca Fortel empregado no estudo.

### 3.3.2 – Análise metalográfica

Para as análises metalográficas foram utilizados os procedimentos padrões de norma, os mesmos empregados na caracterização da matéria-prima, ou seja, as amostras são preparadas com uma sequência de lixas d'água finalizando com um polimento com

alumina de 1 $\mu$ m. Após este procedimento, as amostras foram atacadas em uma solução com ácido fluorídrico 0,5% diluído em etanol e analisadas em um microscópio ótico. O microscópio utilizado é semelhante ao apresentado na figura 17.

As amostras foram retiradas do eixo longitudinal das peças, de modo a se analisar a morfologia dos grãos e precipitados da liga de magnésio AZ61, no sentido em que foi extrudado. Os exames metalográficos foram empregados a todas as variações de processamento e tratamentos térmicos adotados.



Figura 17 - Microscópio ótico GX-51 empregado no estudo.

### **3.3.3 - Ensaio de compressão**

O ensaio de compressão foi aplicado aos corpos-de-prova retirados das peças extrudadas, com e sem tratamento térmico. Os corpos-de-prova foram usinados com 10mm de diâmetro e 15mm de altura e submetidos ao ensaio, o qual foi realizado a temperatura ambiente. Cada variação de processo teve suas propriedades mecânicas caracterizada pela média de três ensaios de compressão.

Neste ensaio, foi utilizado um par de matrizes planas e polidas de aço temperado ABNT H13, lubrificada com o lubrificante gráfitico ROCOL™ - ULTRAFORM 2806 P, com as amostras posicionadas entre eles, recebendo os esforços compressivos descarregados pela máquina.

Novamente nesta etapa foi utilizado o sistema de aquisição de sinal modelo *Spider*<sup>®</sup> e transmitidos a um computador com o *software Catman*<sup>®</sup> instalado, onde o tratamento dos dados é feito. A figura 18 mostra o esquema do experimento de compressão.

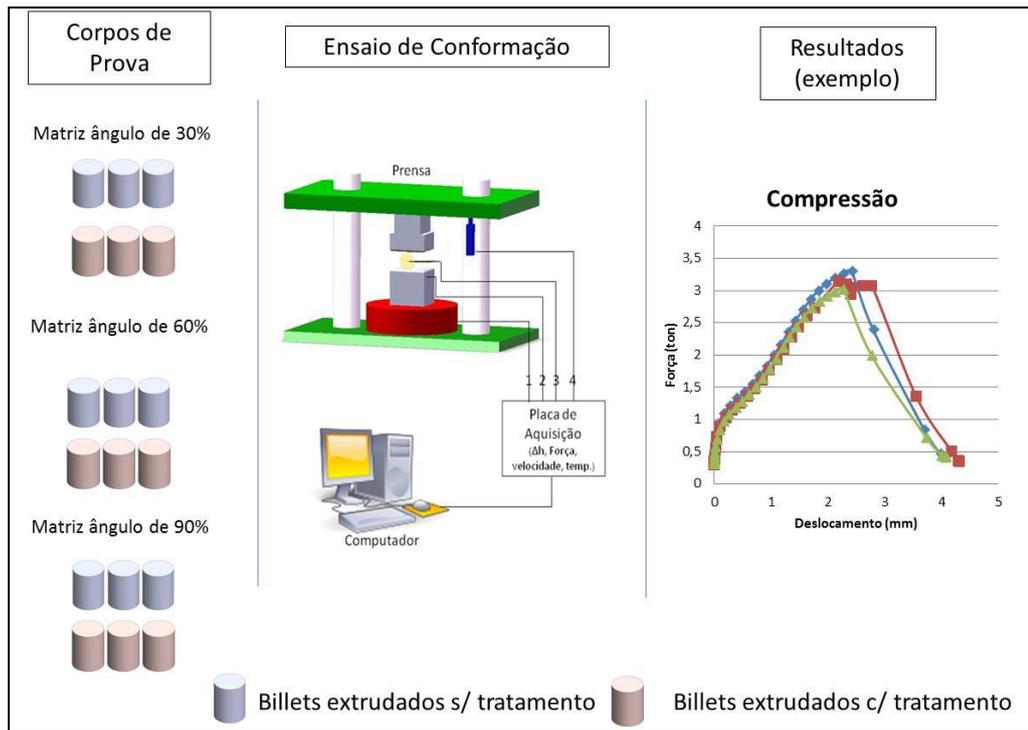


Figura 18 - Esquema gráfico da realização do ensaio de conformação.

### 3.4 – Caracterização da Matéria-Prima

A liga de magnésio AZ61 utilizada como matéria-prima desta pesquisa foi caracterizada quanto a sua composição química, microestrutura, dureza e resistência mecânica à compressão.

A tabela 8 apresenta os valores da composição química da matéria-prima utilizada, de acordo com o certificado de garantia do fornecedor primário da liga de magnésio estudada. Pelos valores expostos na tabela 8, pode se perceber que a liga de magnésio analisada é caracterizada com a liga AZ61A (*standart*).

Tabela 8 - Composição química da liga de magnésio estudada (em % de peso).

<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Outros</b>
92,2	6,21	0,76	0,16	0,02	<0,6

Em relação à microestrutura inicial da matéria-prima, as análises metalográficas revelaram grãos equiaxiais, tamanho 5-8, segundo a norma ASTM E112/95. Em micrometros ( $\mu\text{m}$ ), os diâmetros médios de grão variaram entre 5  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ . A figura 19 apresenta a microestrutura da matéria-prima, atacada com uma solução de ácido fluorídrico, com concentração de 0,5%, diluído em álcool etílico [33].

Pode se perceber que trata-se de uma microestrutura típica de materiais recristalizados, com alguma heterogeneidade na distribuição de tamanho de grão, porém homogeneidade em relação à morfologia dos grãos, onde todos se apresentam de forma equiaxial.

A dureza da liga na escala Brinell, para uma esfera de 2,5mm e carga de 62,5kg. Para a determinação da dureza, foram extraídas amostras da ponta da barra, com pontos de dureza no centro, meio-raio e extremidade radial da seção transversal. Os valores encontrados são apresentados na tabela 9.

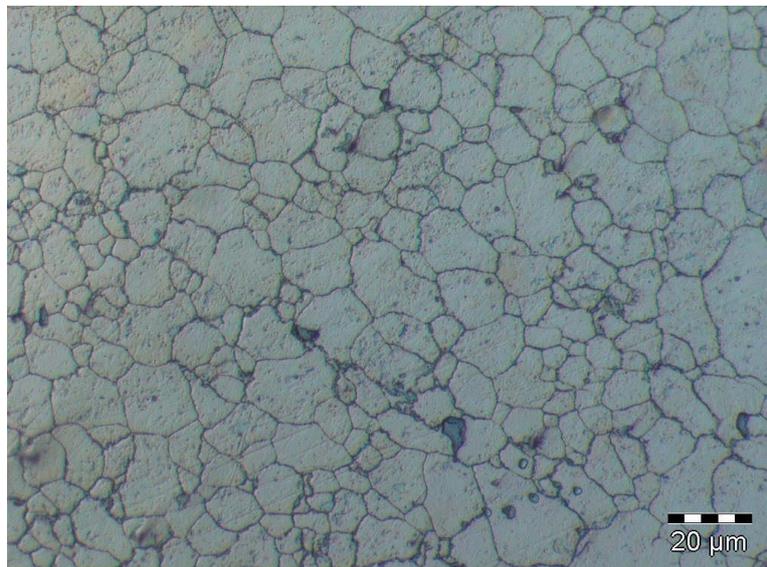


Figura 19 - Microestrutura da liga de magnésio AZ61, antes do forjamento.

Tabela 9 - Valores de dureza da matéria-prima medidos

<b>Matéria-prima</b>	<b>Dureza (HB)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
AZ61	68,9	1,1

Os ensaios de resistência à compressão foram submetidos um total de 5 amostras. A média simples entre estes valores caracterizou as propriedades mecânicas da liga de magnésio AZ61 sob compressão. A tabela 10 apresenta os valores das propriedades mecânicas (em temperatura ambiente) à compressão da liga de magnésio AZ61, em termos de resistência ao escoamento, resistência mecânica máxima e, ainda, ao alongamento do material.

Tabela 10- Propriedades mecânicas à compressão da liga AZ61 não deformada.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Resistência ao Escoamento (MPa)</b>	<b>Resistência Máxima (MPa)</b>	<b>Alongamento Máximo (%)</b>
AZ61	152,8 ± 1,3	370,8 ± 10,8	10,6 ± 0,4

### **3.4 - Simulação Numérica do Processo**

#### **3.4.1 - Dados de Entrada**

Os dados de entrada para simulação numérica computacional foram retirados de fontes bibliográficas, tanto de literatura, quanto do banco de dados do *software* utilizado, além de dados do processo de fabricação, como temperaturas de material, geometrias de ferramentas, deslocamento de punção, entre outros.

As fontes da literatura dizem respeito às propriedades térmicas e mecânicas dos materiais que constituem as matrizes e os *billets* utilizados na simulação. Foram utilizados valores do banco de dados do *software* utilizado (*Simufact Forming*<sup>®</sup> 9.0), com as propriedades do material atribuído para as ferramentas de extrusão (aço ferramenta ABNT H13), e do *billet* da liga de magnésio. A tabela 11 apresenta algumas

propriedades referentes aos materiais, obtidas do banco de dados do *software* e utilizadas nestas simulações.

Tabela 11 - Propriedades necessárias para realização da simulação.

<b>Propriedades na biblioteca do software</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Módulo de Young (Magnésio)	44000	MPa
Coefficiente de Poisson (Magnésio)	0,35	-
Densidade (Magnésio)	1740	kg/m <sup>3</sup>
Condutividade térmica (Magnésio)	159	W/ (m* K)
Capacidade térmica específica (Magnésio)	1030	Joule / (kg * K)
Coefficiente de transferência de calor entre <i>billet</i> e o ambiente	50	(W/m <sup>2</sup> *K)
Coefficiente de transferência de calor entre matriz e o ambiente	50	(W/m <sup>2</sup> *K)
Coefficiente de transferência de calor entre matriz e o <i>billet</i>	20000	(W/m <sup>2</sup> *K)
Emissividade	0,25	-
Atrito (médio-aço em processo à quente)	$\mu = 0,2$	-

Como um dos principais fatores de erro para a simulação computacional são as curvas de escoamento [26], o *software* também apresenta curvas de escoamento existentes em seu banco de dados para ligas de magnésio.

A figura 20 mostra a curva de escoamento na temperatura de 400 °C, que é a mesma utilizada na pesquisa, com variação da tensão de escoamento do material (eixo Y) e da velocidade de deformação (eixo X). Cada temperatura apresenta 3 curvas, e se referem a uma deformação constante de 0,25; 0,5; e 0,75.

A intenção de se utilizar a simulação numérica computacional neste trabalho é somente a de verificar se, com os dados sugeridos pelo *software*, é possível obter uma previsão aceitável da extrusão de ligas de magnésio.

No entanto, nem todos os dados podem ser obtidos do banco de dados do *software*, já que alguns dados de entrada têm origem no processo proposto. As temperaturas desejadas de projeto, por exemplo, é arbitrado pelo operador do programa - engenheiro de processos - e, neste estudo, são admitidos 400 °C para a matéria-prima



Os parâmetros da malha (*mesh*) utilizados para simulação foram gerados automaticamente pelo *software*, com o tipo de elemento infinitesimal do tipo *hexaedral*, usando o *mesh overlay hex* (nomenclatura usada no *software*) com tamanho de elemento de 0,4 mm, para uma análise em três dimensões (3D), como mostra a figura 22. A respeito da malha, não foi realizado um estudo detalhado sobre qual a influência de suas características nos resultados finais, já que o objetivo, neste caso, é somente um estudo comparativo.

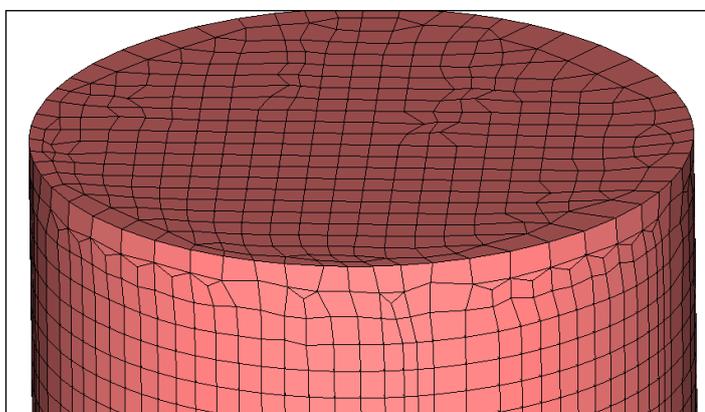


Figura 22 - Imagem retirada do software da malha utilizada no *billet* para simulação.

## 4 – DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1 - Resultados da Simulação Computacional das Extrusões

Após as simulações numéricas computacionais dos processos de extrusão analisados, foi possível se obter os gráficos de força de extrusão das simulações para as três geometrias de ferramental testadas.

Na Figura 23 é apresentado o resultado de Força x Deslocamento para a matriz com ângulo de 30°, com a deformação fixa de 40%. Pode se perceber que a força evolui rapidamente até aproximadamente 6mm de deslocamento do punção, atingindo um pico de força de 8397 N. Este deslocamento é coincidente com a chegada do material ao canal de redução paralelo, momento onde o processo de deformação se torna estacionário (não há mais mudança de forma) e a força tende a diminuir levemente.

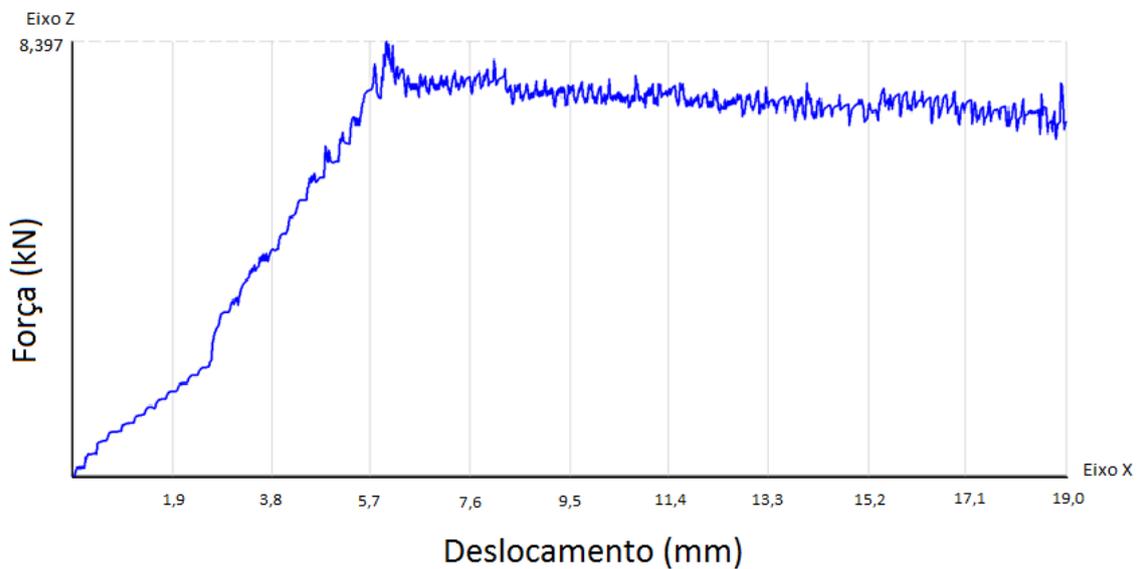


Figura 23 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de 30° e deformação de 40%, obtidos por simulação numérica computacional.

Na figura 24 são apresentados os resultados da simulação para a matriz com ângulo de cone de  $60^\circ$  graus e a mesma redução fixa de 40%. Mesmo não sendo o objetivo do trabalho, uma observação pode ser feita para esse resultado. O comportamento do gráfico tem uma variação de pequenos picos (oscilações) em toda sua extensão. Esse efeito mostra que à medida que os elementos vão diminuindo de tamanho devido às deformações aplicadas nas equações constitutivas, o *software* tende a recalcular o tamanho dos elementos para assim continuar sua programação (figura 9). Deste modo, pequenas oscilações podem aparecer nos resultados quando são apresentados em gráficos.

Quanto à força predita, pode se notar que o comportamento da curva é semelhante a da figura 23, apresentando também uma rampa inclinada inicial, um pico de força e a estabilização relativa da força, após ser atingido o regime estacionário de deformação. O pico de força neste processo é aproximadamente 6851N. Observa-se que este pico é atingido com deslocamento do punção inferior a 4mm – enquanto que na figura anterior este pico só apareceu após 6mm. Explica-se esta antecipação pela diferença na angulação da região do cone, onde um ângulo maior proporciona um cone de menor altura, antecipando a chegada da entrada do canal reto.

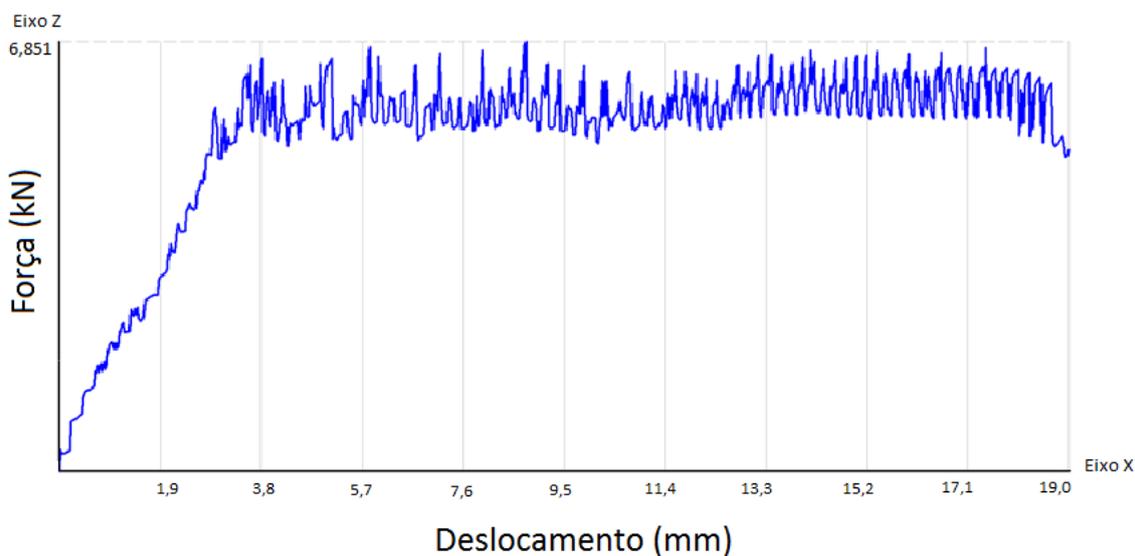


Figura 24 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de  $60^\circ$  e deformação de 40% tirados do programa de simulação.

A última simulação mostra resultados da matriz com o ângulo de 90° e a mesma redução de 40% em área (figura 25). Como nos demais resultados, o gráfico apresenta linhas semelhantes, novamente apresentando uma rampa inclinada, um pico e relativa estabilização de força durante o restante do processo. O ângulo ainda mais obtuso empregado nessa ferramenta antecipa ainda mais o pico de máxima força, o qual é predito em 9413N.

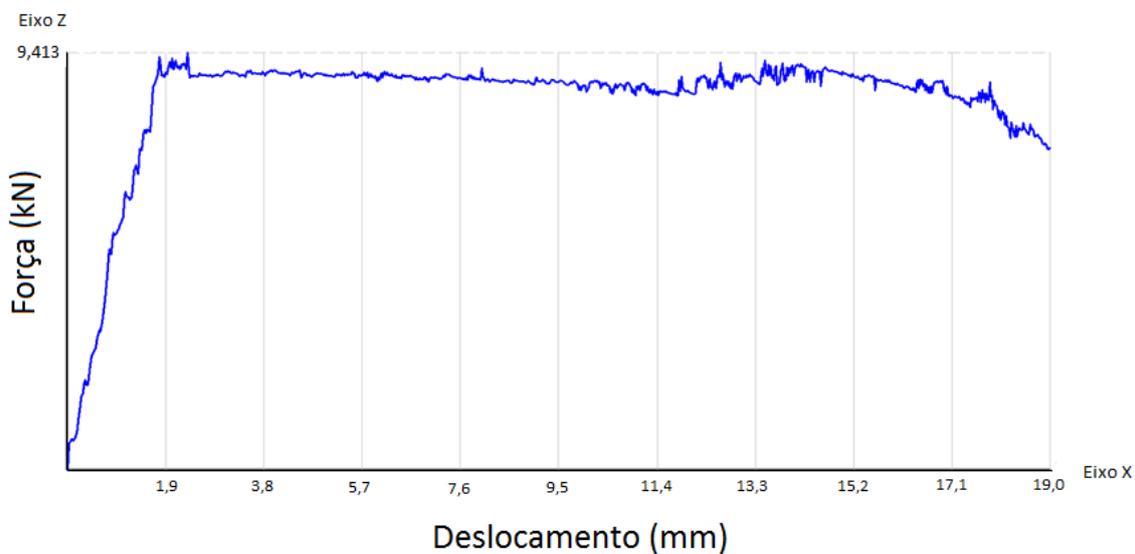


Figura 25 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de 90° e deformação de 40% obtidos do programa de simulação.

A partir dos resultados anteriores foi possível montar a tabela 12, a qual compara as forças máximas esperadas para cada processo de extrusão. Nota-se que a menor força encontrada aparece no ferramental que adota um ângulo de cone intermediário, de 60°.

**Tabela 12 - Propriedades necessárias para realização da simulação.**

Ângulo $\alpha$ (°) / Redução (%)	Força (kN)
30/40	8,3
60/40	6,8
90/40	9,4

É sabido que um ângulo de cone muito baixo aumenta consideravelmente a altura do cone, proporcionando maior deslocamento do material e mais área de parede atritante, o que teoricamente aumenta a força de extrusão. Por outro lado, um ângulo muito obtuso gera uma descontinuidade no fluxo do material, atuando como barreira ao escoamento e, portanto, necessitando também de um incremento de forças para romper este obstáculo. Desta forma, uma angulação ideal de cone deve existir para cada grau de deformação de área pretendido. Neste estudo simulado, embora utilizando dados que se diferenciam um pouco do processo (obtidos por banco de dados do *software*), o ângulo que minimiza a força de extrusão para a redução de 40% em área é o de 60°. Estes valores serão confrontados com os resultados práticos experimentais para se verificar a exatidão desta predição computacional.

#### 4.2 - Resultados das Extrusões Realizadas (Ensaio Físicos)

Ao término das vinte e quatro extrusões realizadas, sendo oito de cada geometria de ferramenta, foi possível a obtenção de peças isentas de trincas visuais em todas as configurações testadas, além da caracterização da evolução da força de conformação ao longo do processo, para cada uma das três variações estudadas.

A figura 26 mostra a geometria final do material após sofrer a extrusão nas três condições propostas nesse estudo.

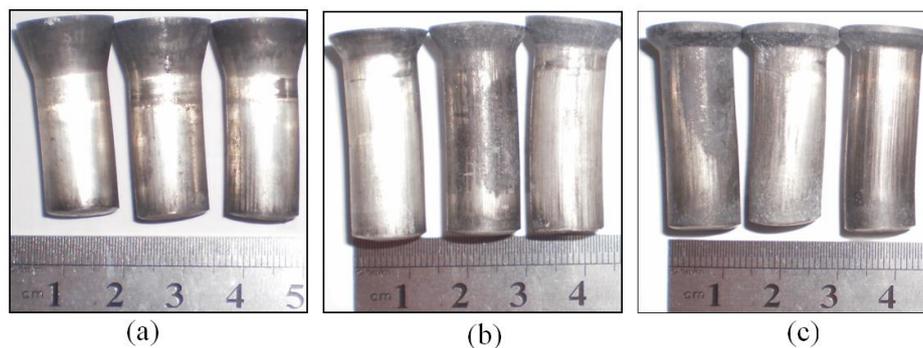


Figura 26 - Geometria final das peças em liga de magnésio extrudadas em matrizes com ângulos de (a) 30°; (b) 60° e (c) 90°.

Cada imagem mostra três corpos de prova com a mesma redução de diâmetro, porém variando o ângulo de cone da matriz (ângulo  $\alpha$ ). Pode-se visualizar na figura 25 as diferenças nas alturas de cone existentes para cada angulação adotada.

A partir dos dados coletados nos experimentos de extrusão realizados, foi possível obter resultados da evolução da força em forma de gráfico, mostrando o comportamento da liga de magnésio AZ61 em cada uma das matrizes.

A figura 27 mostra o comportamento do material quando extrudado numa matriz com ângulo de entrada de  $30^\circ$  e redução de 40%. O resultado mostra que na média, a força máxima necessária para a extrusão é de 3,3 ton (3300 N), porém chegou a alcançar 4,1 ton (4100N) em uma das amostras extrudadas.

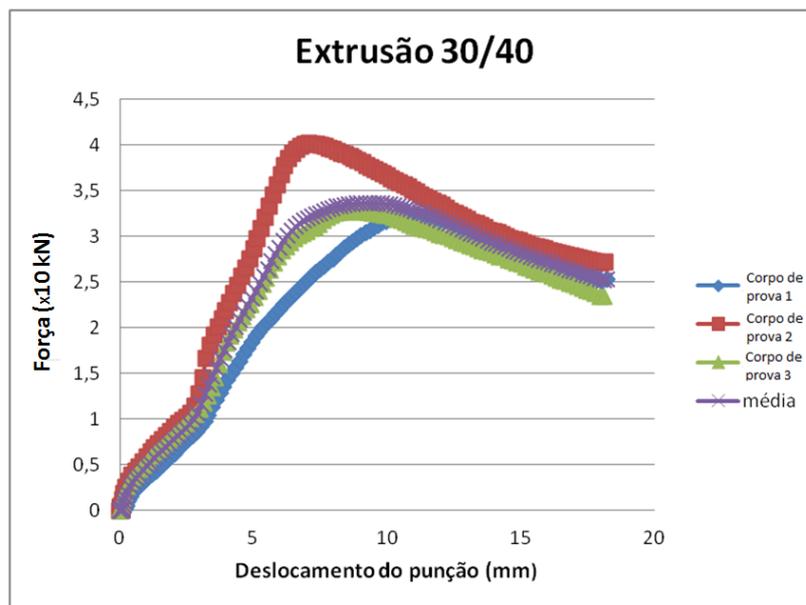


Figura 27 - Gráfico Força x Deslocamento para matrizes com ângulo de  $30^\circ$  e deformação de 40%.

Comparando este último resultado apresentado (figura 27) com o da simulação para estas mesmas configurações geométricas (figura 23), é possível notar algumas semelhanças na natureza das curvas.

No início de ambos os gráficos, que corresponde a um deslocamento de punção menor que 4 mm, a inclinação da reta do gráfico é suave. Logo depois ocorre um aumento drástico dessa inclinação e as linhas dos gráficos seguem até atingiram um pico máximo de força, onde, após este valor de topo, evidencia-se um declínio de força. Uma comparação visual é apresentada a seguir na figura 28.

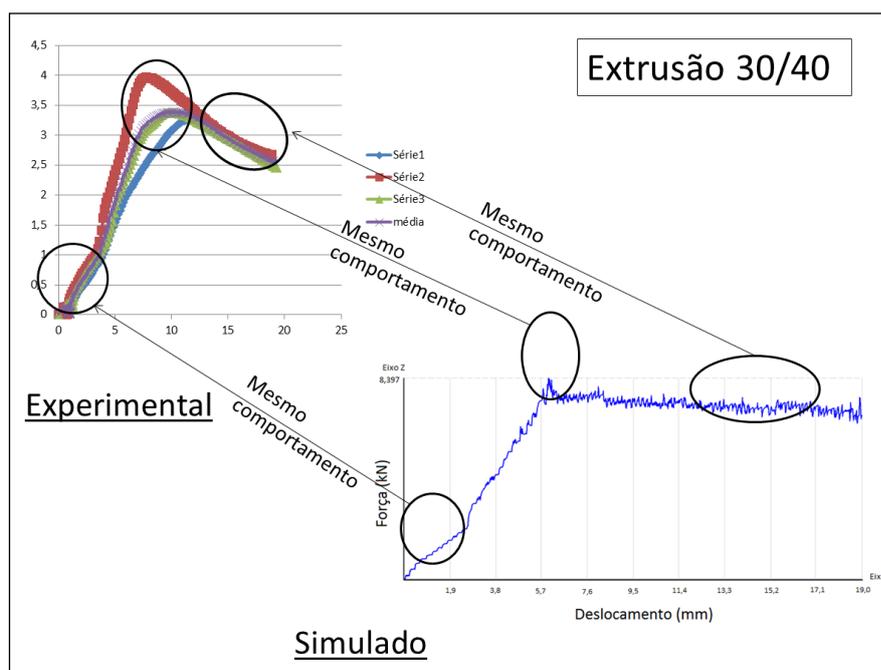


Figura 28 - Comparação entre as curvas experimentais e a curva obtida através da simulação para a matriz de ângulo 30° e deformação de 40%.

Embora os resultados de força da simulação não apresentarem a mesma grandeza numérica dos resultados experimentais, neste caso fica evidente que, com a similaridade dos gráficos, é possível prever o comportamento de força durante o processo através da simulação numérica computacional. Como o objetivo não era prever quais seriam os valores de força no processo, mas sim analisar o comportamento da força no processo, a simulação atingiu resultados significativos.

O segundo resultado analisado foi o da matriz de ângulo de 60° e redução de diâmetro de 40%. A figura 29 mostra o gráfico das curvas força x deslocamento da

extrusão experimental. As curvas do gráfico obtido mostram a presença de um pico de força, seguida de um relaxamento na força de extrusão, como foi também encontrado nos demais processos de extrusão realizados. Porém nesse caso após o patamar é formado um novo pico de aumento da carga, antecedendo ao relaxamento da força.

Em relação às forças alcançadas para esse experimento foi obtido o máximo de 3,1 ton (3100 N), mas a média encontrada não ultrapassou 2,5 ton (2500 N).

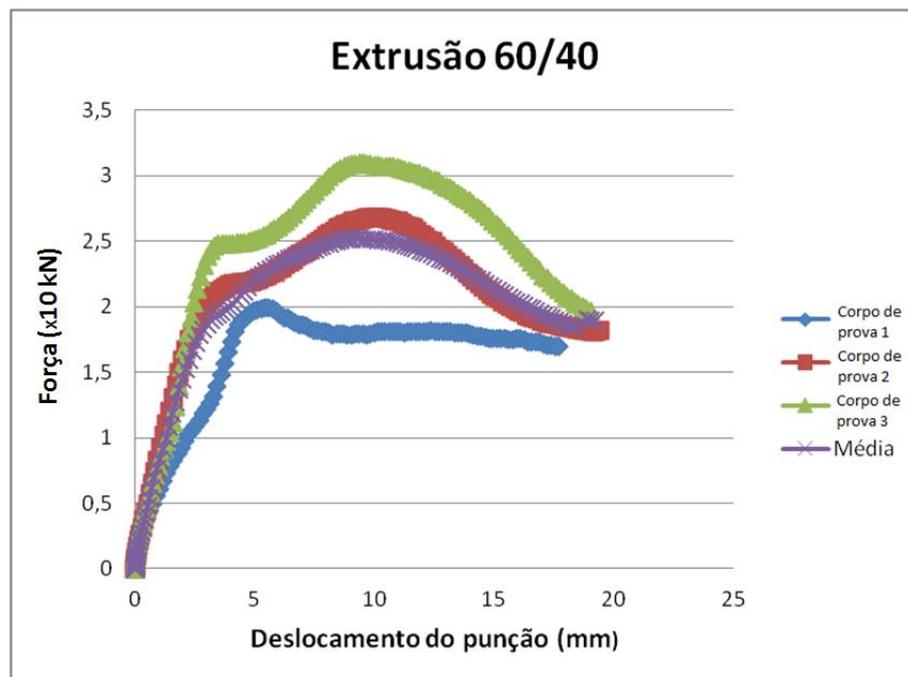


Figura 219 - Gráfico Força x Deslocamento para matriz com ângulo de  $60^\circ$  e deformação de 40%.

Quando os resultados da simulação e os experimentais são confrontados, diferente do caso anterior, na configuração de ângulo de  $60^\circ$  e redução de 40% os resultados em forma de gráfico não exibem significativa semelhança.

A figura 30 mostra a comparação entre as curvas experimental x simulada, exibindo que no início dos gráficos, estes possuem o mesmo comportamento, praticamente até 4 mm de deslocamento do punção. Neste ponto ocorre uma inclinação da reta representando o aumento de força. Contudo, no restante do gráfico as semelhanças não são mais identificadas. No resultado simulado, apesar de aparecerem

pequenas oscilações em toda extensão da reta, o gráfico apresenta uma tendência a ser constante após alcançar o regime estacionário de deformação. No caso das extrusões experimentais, em seguida do primeiro pico de força, as curvas apresentam um secundário aumento na intensidade da força e, na sequência, uma nova diminuição de força até o final do processo. A origem desse comportamento anômalo das curvas de extrusão pode ter fundamento em fenômenos metalúrgicos ainda não completamente conhecidos nas ligas de magnésio.

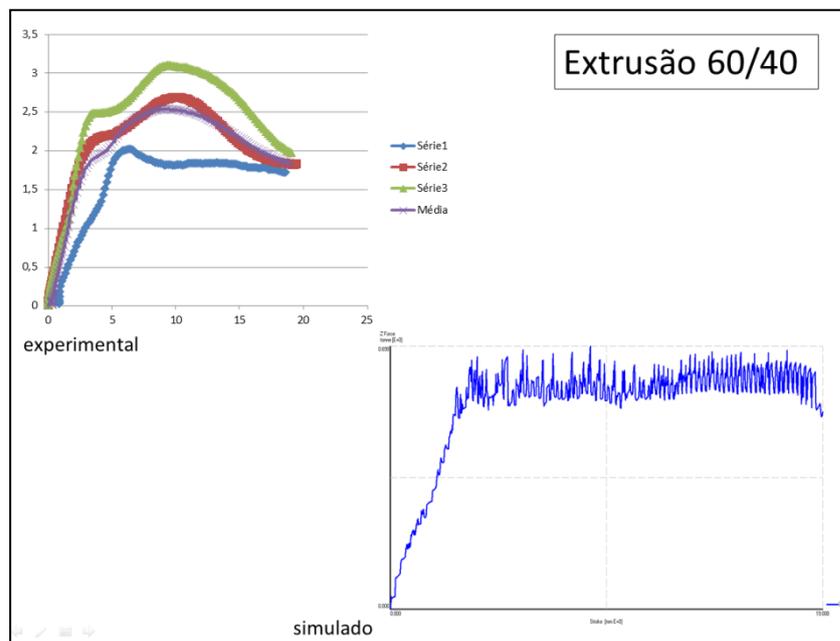


Figura 302 - Comparação entre as curvas experimentais e a curva obtida através da simulação para a matriz de ângulo 60° e deformação de 40%.

O último resultado gráfico, apresentado pela figura 31, refere-se ao processo experimental da matriz com a configuração de ângulo de cone de 90° e redução de 40%. Analisando a média dos resultados obtidos, a força máxima para esse processo foi de 2,4 ton (2400 N), onde a amostra que mais demandou força de extrusão alcançou 2,8 ton (2800 N).

Nesse caso, os resultados experimental e o simulado também se mostraram semelhantes, tal qual foram os gráficos referentes ao processo com angulação de 30°.

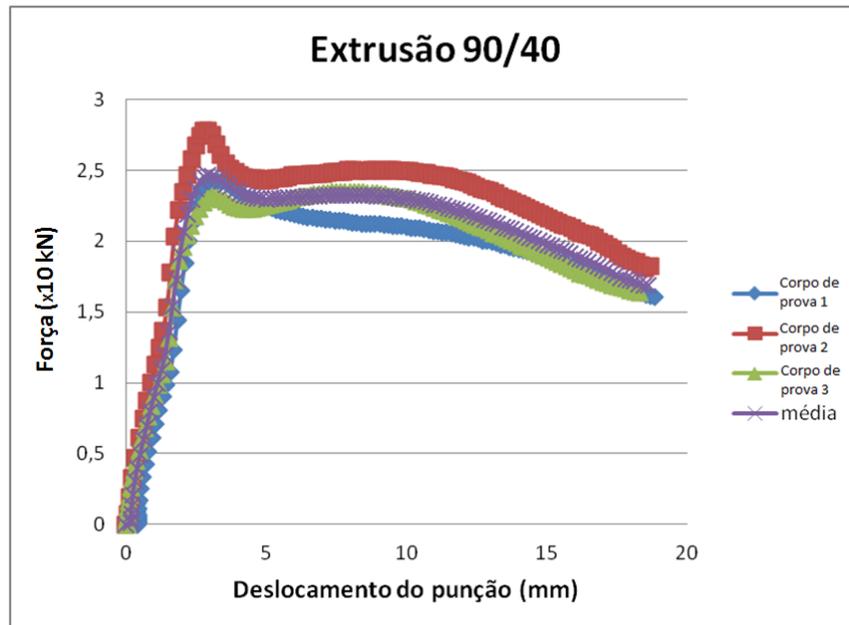


Figura 31 - Gráfico Força x Deslocamento para matriz com ângulo de 90° e deformação de 40%.

Os gráficos iniciam com suas curvas com inclinação bastante íngreme (como mostra a figura 32) até atingirem a força máxima, que ocorre aproximadamente com o deslocamento de punção de 2 mm. Após a força máxima ser alcançada, há uma queda considerável na magnitude da força de extrusão e, por seguinte, a força tende a perder magnitude de maneira mais suave.

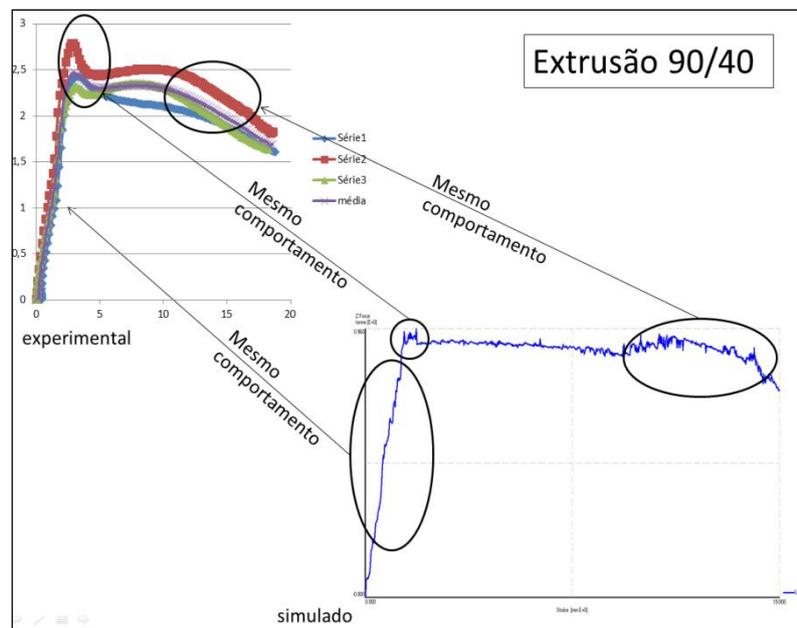


Figura 32 - Comparação entre as curvas experimentais e a curva obtida através da simulação para a matriz de ângulo 90° e deformação de 40%.

Como na comparação feita entre o processo simulado e o experimental da matriz de ângulo de 30°, a comparação dos resultados da matriz de ângulo de 90° mostra uma similaridade dos gráficos.

Nesse caso, a simulação não foi eficiente para prever o comportamento da força de extrusão. Porém, nas simulações não foram empregadas as propriedades da liga AZ61 reais e sim propriedades do banco de dados do *software*, que é genérico para todas as ligas de magnésio deformáveis, e é possível que, com o emprego das propriedades de fato do material a ser deformado, a comparação apresente resultados ainda mais próximos.

Fazendo uma comparação somente dos dados experimentais, mais especificamente em relação às forças máximas alcançadas em cada uma das geometrias propostas, foi montada a tabela 13 abaixo:

Tabela 13 - Resultado das forças máximas obtidas através das extrusões experimentais.

<b>Geometria da matriz (ângulo/deformação)</b>	<b>Força máxima da média (kN)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
30/40	33	± 1,2
60/40	23	± 2,9
90/40	24	± 0,9

A tabela 13 sugere que a matriz com o ângulo de cone mais severo, constituído em 90°, apresenta a minimização de força dentre os ângulos testados, além de apresentar também o menor desvio padrão entre os gráficos analisados. Porém devido aos resultados de força dos ângulos de 60° e 90° estarem próximos, os desvios padrão dos resultados, mostram que o resultado de experimental e simulação são coerentes.

Com o intuito de apresentar um maior número de resultados para o ensaio de extrusão foi realizada uma comparação através de cálculos analíticos das velocidades de deformação. Para isso se fez do uso da equação 3, e assim por consequência foi possível montar a tabela 14. Os ângulos estão representados na figura 6.

Tabela 14- Comparação das velocidades de deformações médias

Ângulo $\alpha$	Ângulo $\gamma$	Tan ( $\gamma + 90$ )	Diâmetro inicial $d_0$ (mm)	Diâmetro Final $d_f$ (mm)	Deformação $\phi$ (-)	Velocidade da prensa $VF$ (mm/s)	Velocidade de deformação média ( $s^{-1}$ )
30	15	3,73	16	12	0,54	6	4,83
60	30	1,73	16	12	0,54	6	2,24
90	45	1	16	12	0,54	6	1,29

#### 4.5 – Ensaios de Dureza

As peças extrudadas, com e sem tratamento térmico, foram submetidas ao ensaio de dureza Brinell. Na Figura 33 é possível visualizar uma das impressões impostas nas peças extrudadas.

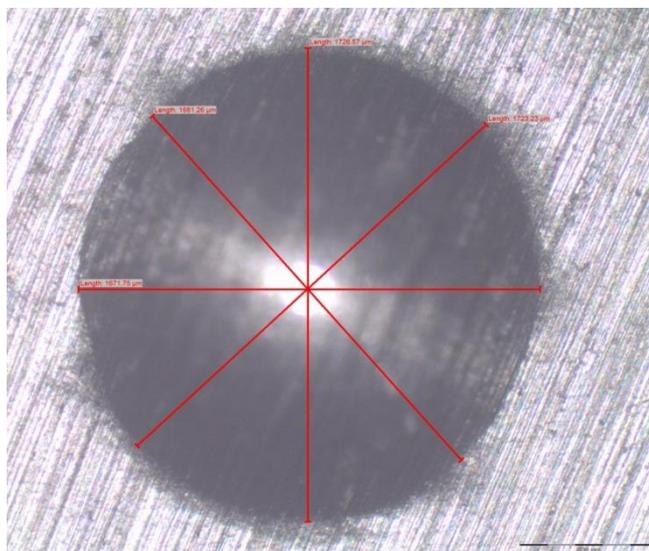


Figura 33 - Imagem da impressão no corpo de prova com ângulo de 90° que sofreu o tratamento térmico.

Depois de adquirir as imagens de todas as impressões, foram calculadas as médias das medidas para utilizar na fórmula proposta por Brinell. Assim foi possível construir a tabela 15 abaixo, onde foram utilizados corpos de prova de cada uma das diferentes condições estudadas, onde foram realizadas três penetrações em cada um deles.

Tabela 15 - Resultados de dureza das diferentes condições estudadas.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Média das penetrações (mm)</b>	<b>HB</b>
90°40 Tratado	1,72	70,3
90°40 Sem tratamento	1,67	75,1
60°40 Tratado	1,72	70,1
60°40 Sem tratamento	1,67	75,4
30°40 Tratamento	1,74	68,7
30°40 Sem tratamento	1,71	70,9

Na comparação mostrada na tabela 15, pode ser identificado um padrão em todos os casos: para qualquer geometria de ferramenta, as amostras que passaram por um tratamento térmico diminuíram sua dureza em relação àquelas que não sofreram o tratamento térmico.

Desta maneira, fica evidenciado que o tratamento térmico imposto nas peças extrudadas, para fins de aumento de dureza das peças, não se demonstrou eficaz experimentalmente.

#### **4.6 – Ensaios de Resistência Mecânica à Compressão a Frio**

Os corpos-de-prova extraídos das peças extrudadas, com e sem tratamentos térmicos, foram submetidos à ensaios de resistência mecânica à compressão.

Em relação à fratura, todos os corpos-de-prova ensaiados tiveram o mesmo comportamento em relação ao seu rompimento, ou seja, romperam a  $45^\circ$  do eixo de aplicação da força (figura 34), como é característico dos materiais frágeis constituídos por arranjos hexagonais compacto. Essa fratura também evidencia a fragilidade da liga de magnésio em temperatura ambiente.



Figura 34 - Amostras submetidas ao ensaio de compressão.

Os gráficos a seguir foram plotados com os dados de força e deslocamento retirados do ensaio de compressão e convertidas em tensão e deformação. Na sequência é mostrado uma comparação das peças extrudadas com uma matriz de mesmo ângulo de cone, variando-se apenas a condição de tratamento térmico (com ou sem).

As curvas apresentadas se referem às médias dos três ensaios de compressão realizados para cada condição estudada. As curvas representadas pelos marcadores na forma de losangos são as peças sem tratamento térmico, enquanto que as curvas desenhadas com marcadores quadrados são as peças após serem tratadas termicamente.

A figura 34 compara as peças extrudadas na matriz cujo ângulo de cone é de  $30^\circ$ , com deformação relativa em área de 40%, confrontando as peças tratadas e não-tratadas.

Analisando a figura 35, que mostra o gráfico “tensão x deformação” para a matriz com ângulo de  $30^\circ$  e deformação de 40%, verifica-se que os corpos-de-prova que não passaram pelo tratamento térmico proposto (T6) alcançaram uma tensão de ruptura maior do que os demais corpos-de-prova.

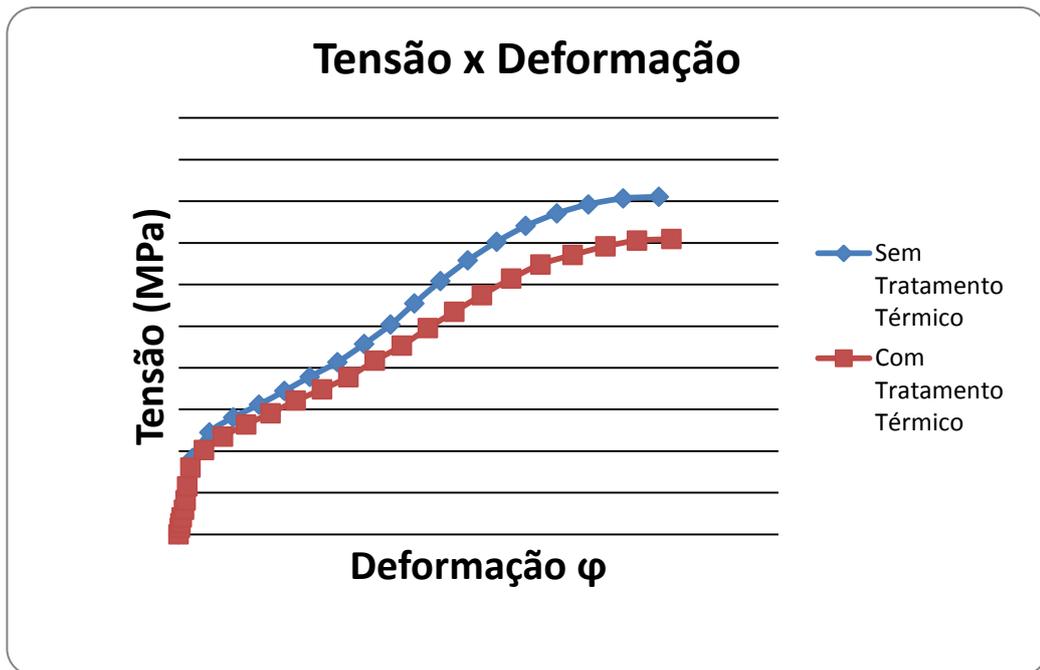


Figura 35 - Gráfico comparativo Tensão x Deformação para matriz com ângulo de 30° e deformação de 40%, em corpos de prova com e sem tratamento.

Estas amostras, sem tratamento térmico, atingiram uma tensão de 405,4 MPa, enquanto que os corpos-de-prova que sofreram tratamento térmico foi obtido 354,5 MPa de tensão máxima. Outra constatação nos resultados foi que sem tratamento térmico a tensão de ruptura foi alcançada em uma deformação de 16% e para os corpos com tratamento essa deformação atingiu 16,4%. A tensão de escoamento nos dois casos ficou, 91,5 MPa e 80,3 MPa para a liga não tratada e tratada, respectivamente.

Na comparação entre os corpos de prova extrudados na matriz de ângulo de 60° (figura 36) as tensões de ruptura também atingiram um maior valor nos corpos de prova que não foram submetidos ao tratamento térmico. O confronto dos resultados mostra que a tensão de ruptura nos corpos-de-prova não tratados chega a 410,9 MPa e para os corpos-de-prova tratados é de 382,5 MPa.

A deformação dos corpos tratados termicamente alcançou 18% e sua tensão de escoamento foi de aproximadamente 96,0 MPa. Já para os corpos-de-prova sem tratamento, o alongamento foi de 16% e próximo a 87,2 N/mm<sup>2</sup> de tensão de escoamento.

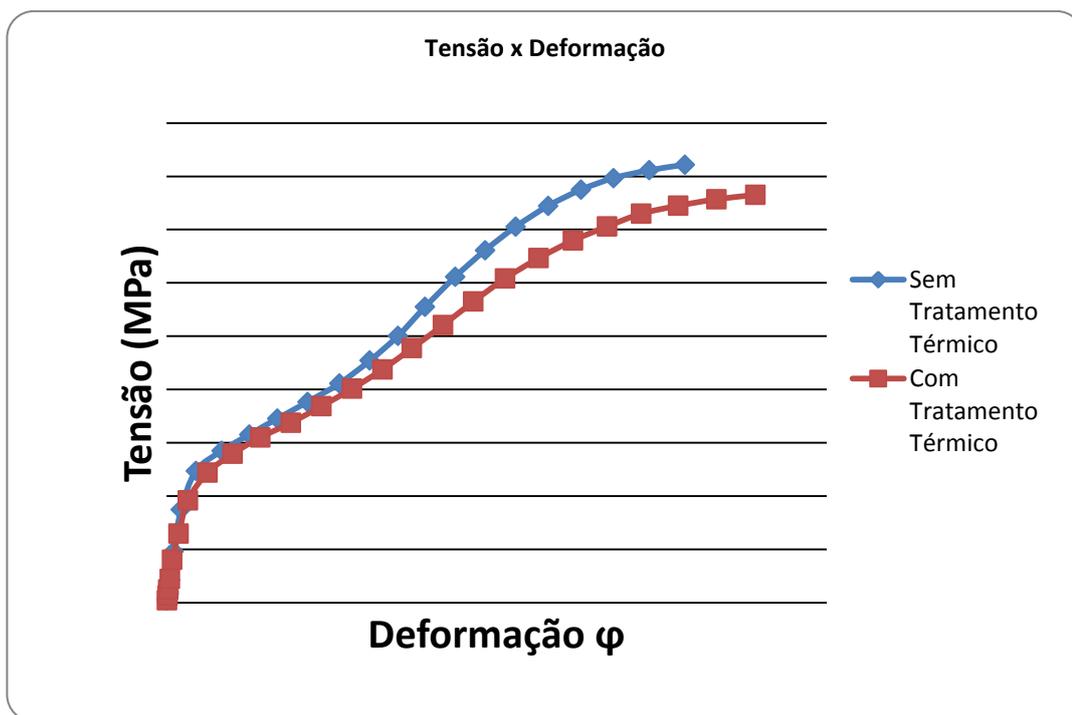


Figura 36 - Gráfico comparativo Tensão x Deformação para matrizes com ângulo de 60° e deformação de 40%, em corpos de prova com e sem tratamento.

Finalizando as comparações de tensão-deformação, a figura 37 apresenta os corpos-de-prova da matriz com ângulo 90°, com e sem tratamento térmico T6. Nesse último caso, a tensão de ruptura dos materiais não tratados foi maior que a dos tratados, 388,5 MPa e 359,9 MPa, respectivamente, configurando-se em uma diferença de 7,3%. A tensão de escoamento também apresentou valores maiores para os não tratados (125,5 MPa), em relação aos corpos-de-prova tratados termicamente (89,9 MPa). A máxima deformação alcançada dos corpos-de-prova foi de 17% nos tratados e 15% para as amostras não tratadas.

Nos três casos estudados, as amostras não obtiveram nenhuma melhoria na resistência mecânica após serem tratadas termicamente. Pelo contrário, os gráficos mostram uma acentuada perda nas propriedades mecânicas das ligas que sofreram tratamentos térmicos.

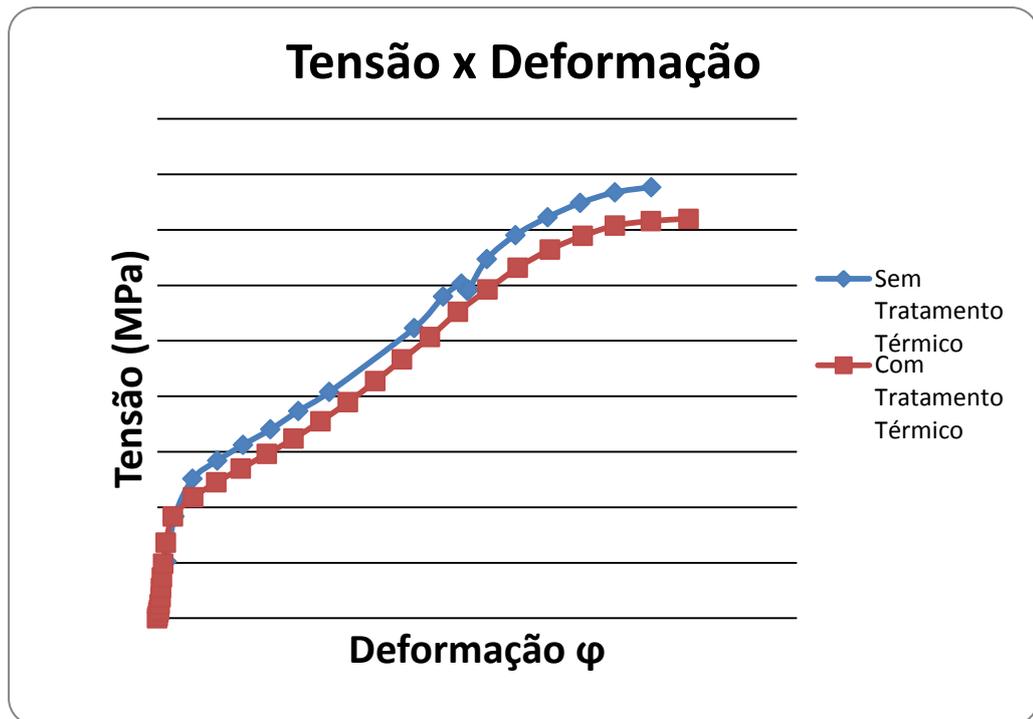


Figura 37 - Gráfico comparativo Tensão x Deformação para matrizes com ângulo de 90° e deformação de 40%, em corpos de prova com e sem tratamento.

Esta constatação vem em concordância com algumas referências bibliográficas, que rejeitam o tratamento térmico da liga AZ61, posterior à deformação mecânica [23, 24]. Por outro lado, o tratamento térmico empregado aumentou a ductilidade da liga de magnésio AZ61, para todos os processos analisados. Esta análise pode também ser apresenta conforme a tabela 16 abaixo:

Tabela 16 - Resultados de deformação máxima e tensão máxima de ruptura para todos os casos estudados.

Geometria da matriz (ângulo/deformação)	Característica	Deformação máxima (em porcentagem)	Tensão máxima de ruptura (MPa)
30/40	Sem tratamento térmico	16%	405,4
	Com tratamento térmico	16,4%	354,5

60/40	Sem tratamento térmico	16%	410,9
	Com tratamento térmico	18%	382,5
90/40	Sem tratamento térmico	15%	388,5
	Com tratamento térmico	17%	359,9

Apesar das comparações entre as deformações máximas estarem muito próximas, esse trabalho ratifica alguns dados obtidos na literatura [23,24].

#### 4.7 – Metalografia

Cada um dos casos estudados, variação ângulo de cone e corpos-de-prova tratados ou não tratados termicamente, tiveram suas metalografias realizadas e avaliadas nesta pesquisa.

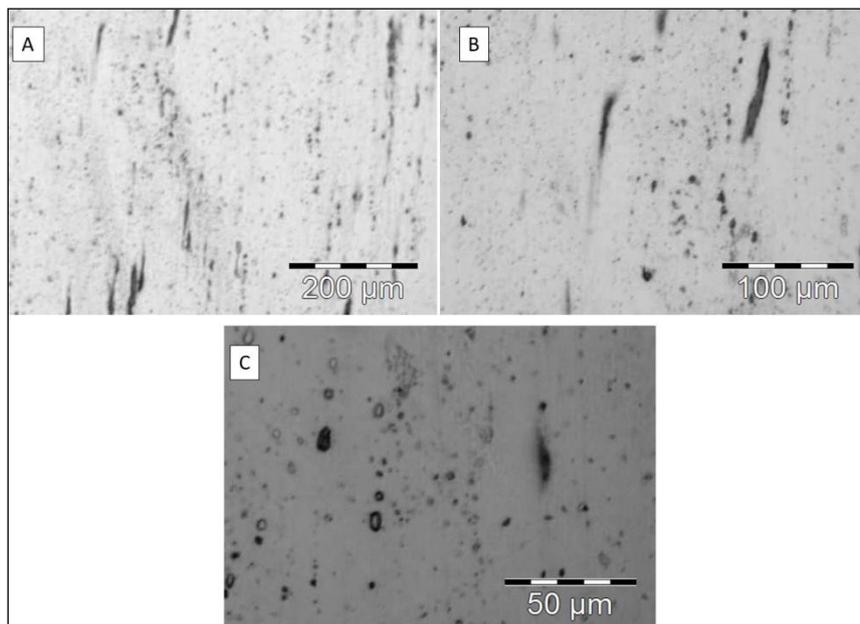


Figura 38 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 30°, sem tratamento térmico.

Os resultados metalográficos obtidos com a conformação na matriz de ângulo de cone de 30° e sem tratamento térmico, mostra que o material sofreu a ação de deformação imposta, orientando o material na direção do fluxo do escoamento (figura 38). Porém, nas imagens adquiridas, não é possível identificar o formato de um grão definido, somente o alinhamento foi percebido pela posição dos precipitados no interior da liga (regiões escuras).

As metalografias dos corpos-de-prova extrudados com a matriz de 30° e tratadas termicamente, são apresentadas na figura 39.

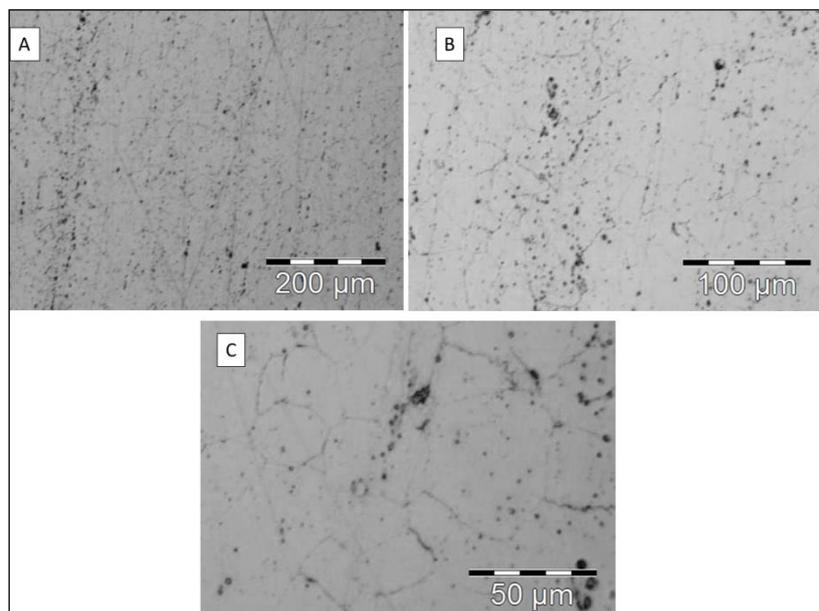


Figura 39 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada em ferramenta de ângulo de 30°, tratadas termicamente.

Após o tratamento térmico, os grãos da peça extrudada com 30° de angulação ficam mais perceptíveis. Os precipitados aparecem com diminuição de tamanho e maior dispersão, tanto nos contornos, quanto no interior do grão.

Ao se comparar as peças extrudadas com matriz de ângulo de 30° e tratadas termicamente (figura 39), com a matéria-prima não deformada (figura 19), pode se perceber que com tratamento térmico houve um significativo aumento do tamanho de grão médio e o coalescimento dos precipitados. Estes dois fatores possivelmente são os

responsáveis pela diminuição de dureza e resistência mecânica experimentada pelas peças após tratamento térmico T6. Comparando as peças tratadas e não tratadas termicamente houve uma recuperação dos grãos encruados após o tratamento térmico. Isso explica porque o material não tratado tem uma resistência maior que o não tratado.

As imagens metalográficas obtidas para as peças extrudadas na matriz de ângulo de 60° são apresentadas nas figuras 40 e 41. A figura 40 exibe a liga sem tratamento térmico. No aumento menor (figura 40a), é possível observar a influência do processo no fluxo do material, dando um direcionamento aos grãos do material, os quais aparecem, em alguns pontos, alongados.

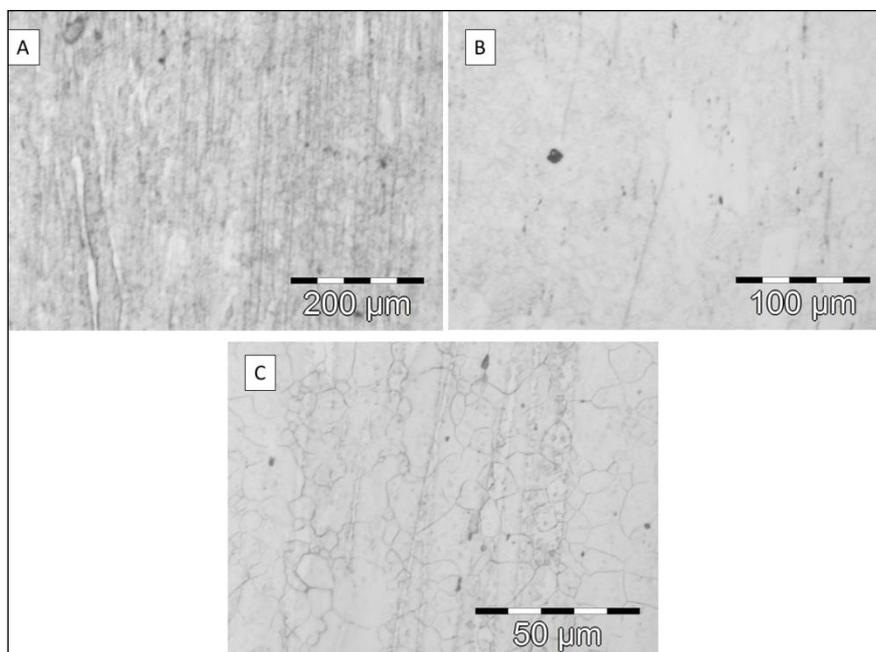


Figura 40 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 60°, e sem tratamento térmico

Ainda na mesma amostra, em um aumento maior, a figura 39c exibe grãos com uma distribuição de tamanhos bastante significativa. Esse efeito evidencia a recristalização parcial da microestrutura, e vai ao encontro os resultados encontrados por outros trabalhos [18-19], já discutidos na revisão bibliográfica. Em relação ao tamanho de grão, pode se perceber que os grãos recristalizados tem pequenas

dimensões, com diâmetros médios inferiores a 10  $\mu\text{m}$ , enquanto que os grãos originais, coalescidos, possuem dimensões que, em alguns casos, superam os 50  $\mu\text{m}$ . porem

Com o tratamento térmico, os corpos-de-prova da matriz de ângulo de 60° aumentaram muito o numero de grãos (figura 40), evidenciando a presença de recristalização. Na figura 40a, de menor aumento, é possível identificar linhas onde grãos menores, recristalizados, aparecem com maior frequência, ao passo em que outras regiões, os grãos do material se apresentam coalescidos. Na medida em que a ampliação de imagem torna-se maior, os contornos de grão são melhor visualizados e a distribuição de tamanhos de grão fica mais evidenciada.

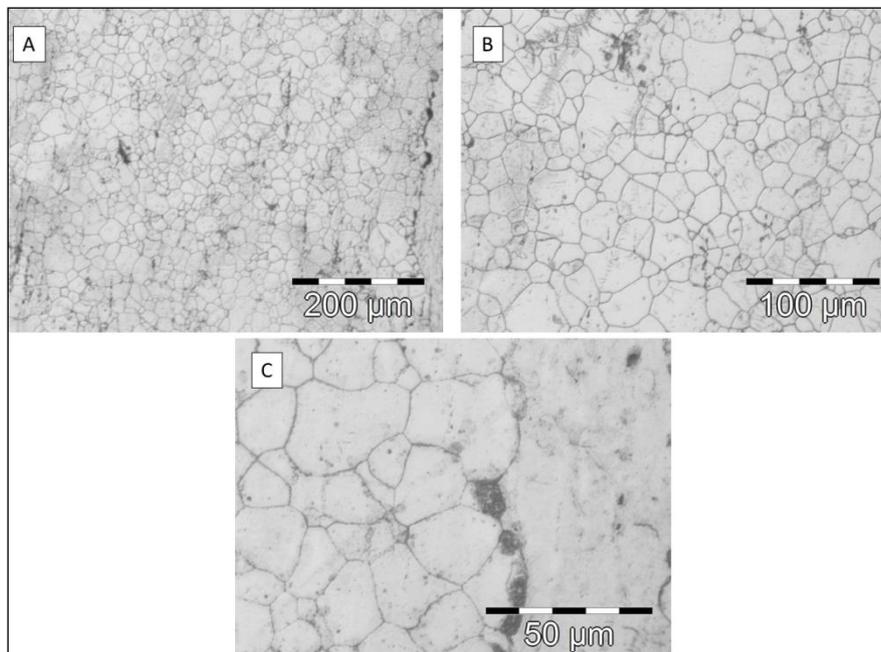


Figura 41 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 60°, tratadas termicamente.

Nestas imagens, os precipitados ficam menos visível, sugerindo uma dispersão mais fina na matriz do magnésio, o que pode ser uma explicação para o aumento de resistência mecânica observado nas peças extrudadas com esta geometria de matriz, em comparação direta com as peças da geometria anterior, de 30°.

Relativamente às peças extrudadas com a matriz de angulação de 90°, as análises metalográficas são apresentadas pelas figuras 42 (somente deformada) e 43 (após tratamento térmico).

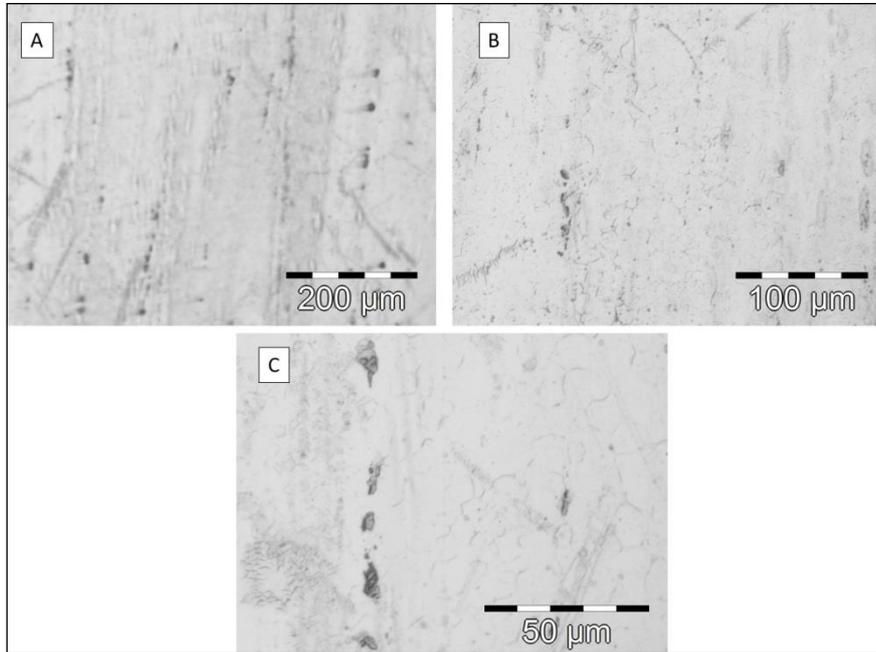


Figura 42 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 90°, e sem tratamento térmico.

Na figura 41a, embora pouco nítido, pode ser visualizado regiões onde os grãos aparecem com algum alinhamento, na direção de extrusão. Na figura 42b, com maior aumento, contornos de grão são revelados, apresentando uma distribuição de tamanhos de grão, novamente atribuída à recristalização parcial dos grãos. Os precipitados são pouco visíveis em todos os aumentos impostos.

Em relação à figura 43, referente às peças extrudadas com matriz de 90° e tratadas termicamente, já pode se perceber a presença de precipitados coalescidos, o que possivelmente explica a perda de dureza e resistência mecânica em comparação com as peças apenas extrudadas.

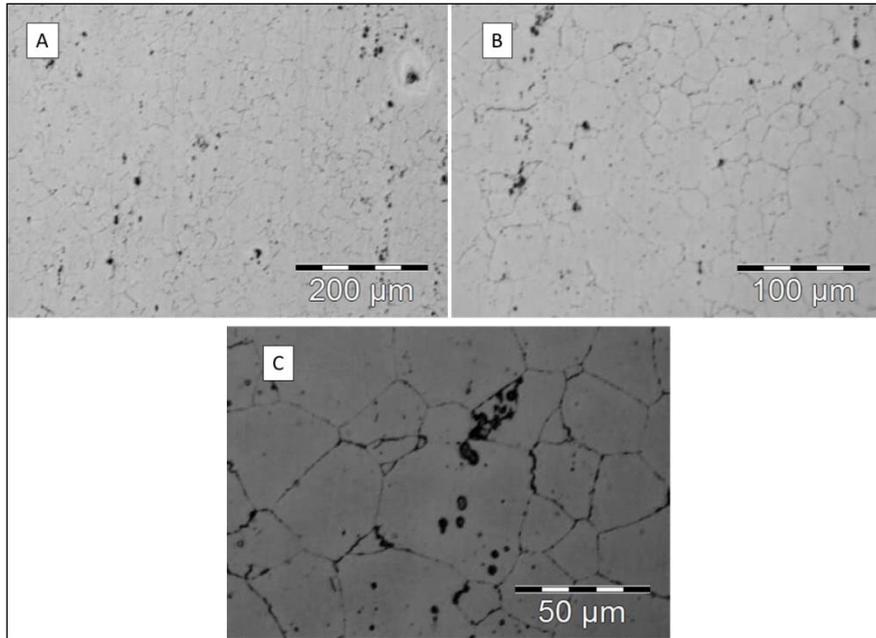


Figura 43 - Imagens metalográficas da liga AZ61 extrudada com uma redução de 40% de seu diâmetro inicial e ângulo de 60°, tratadas termicamente.

## 5 - CONCLUSÕES

Em relação à força de extrusão, a simulação numérica computacional indicou que existe uma angulação otimizada de ferramenta para uma dada redução de área imposta. Essa indicação deriva do não correlacionamento entre o aumento do ângulo de ferramenta e o aumento da força de extrusão.

Nas simulações realizadas, a matriz de ângulo de cone 60° obteve o resultado mais baixo de força, seguida da matriz de ângulo de 30°, e por último, a maior força foi predita para a ferramenta com ângulo de cone de 90°.

Embora os dados de entrada da simulação não foram os ideais, sendo empregado apenas o banco de dados do *software* de simulação utilizado, as curvas simuladas tiveram comportamento bastante semelhante às curvas experimentais, no que diz respeito a sua trajetória.

Os processos de extrusões reais mostraram um comportamento diferente dos simulados, em relação à minimização de força de extrusão. Os experimentos apresentaram a matriz de ângulo de 90° como a que exige um menor esforço de processamento, seguido da matriz de ângulo de 60° e, por fim, o ângulo de 30° foi o que requereu a maior força de conformação.

Estes resultados experimentais mostram que, quanto maior a superfície de parede da região do cone, maior a força de extrusão. Isso indica que o atrito presente no processo teve uma forte influência na extrusão da liga de AZ61, nas condições em que os experimentos foram realizados.

O tratamento térmico T6 aplicado nas peças extrudadas não foi efetivo, no sentido de melhorar as propriedades mecânicas do material. Pelo contrário, as peças tratadas apresentaram perdas de resistência mecânica e ao escoamento, além de redução na dureza, quando comparadas com as peças apenas deformadas.

As análises metalográficas indicaram que os tratamentos térmicos impostos resultaram em um coalescimento dos precipitados  $Mg_{17}Al_{12}$ , além de crescimento de

grão da matriz do magnésio, de forma que estas mudanças microestruturais influenciaram na perda de propriedades mecânicas da peça extrudada.

Todas as variáveis de ferramentas testadas geraram peças extrudadas com propriedades mecânicas melhores, em relação à matéria-prima. As peças extrudadas um nível de encruamento que favoreceu esse aumento nas propriedades.

## 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar as simulações propostas neste estudo utilizando dados mais realísticos do processo e dos materiais empregados, em detrimento do uso de banco de dados do *software*;
- Realizar mais passes de extrusões convencionais, avaliando a evolução da fração de grãos recristalizados em cada etapa de processamento;
- Tratar termicamente as peças com tempos de exposição à temperatura menores, evitando o coalescimento dos precipitados;
- Realizar processos de deformação plástica severa (SPD) na liga de magnésio estudada, como a extrusão angular (*equal channel angular pressing* – ECAP), para propiciar um maior refino de grão da liga de magnésio;
- Extrudar ligas de magnésio de maior teor de elemento de liga, como a liga AZ80 e realizar tratamentos térmicos.

## 7 - BIBLIOGRAFIA

[1] SILLEKENS, W.H.; LETZIG, D.; “The MagForge Project: European Community Research on Forging of Magnesium Alloys“. Proceedings of the 7th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications. Pg. 999 – 1005. Dresden, Germany, 2006.

[2] FISCHER, G.; BECKER, J.; STICH, A.; “Gesenshmieden hochfester Magnesium- Knetlegierungen fuÈ r Bauteile der Automobil- und Luftfahrtindustrie” Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, V.31, pg. 993 – 999. WILEY-VCH Verlag GmbH, Germany, 2000.

[3] FRIEDRICH, H.E.; MORDIKE, B.L. “Magnesium Technology Metallurgy”, Design Data, Applications. Springer-Verlag, Berlin 2006.

[4] FIGUEIREDO, A. P.; “Análise da solidificação de ligas de magnésio para aplicação na fabricação de motores”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. PPGEM, 2008

[5] Banco de dados digital MatWeb. Disponível em [www.matweb.com](http://www.matweb.com) acessado em 10 de agosto de 2011.

[6] VIEHWEGER, B., KARABET, A., DURING, M., SCHAEFFER, L.; “Forging of Mg-Alloys AZ31 and AZ80”. Mat-wiss. u. Werkstofftech. 36, 2005.

[7] CARAM Jr., Rubens. ; “Estrutura e Propriedades dos Materiais”. Apostila da disciplina EM342. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2000. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~caram/capitulo3.pdf> Acessado em 18 de fevereiro de 2010.

[8] PADILHA, A. F.; “Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades”. Editora Hemus. São Paulo, 2000.

[9] CALLISTER, W.; “Ciência e engenharia de materiais, uma introdução” 5ª Ed. Editora LTC, São Paulo, 2002.

[10] CHAPMAN, J. A. PhD. Thesis, University of Birmingham, 1963. Cito em: KAINER, K.U.: “Magnesium – Alloys and Technologies”. Wiley-VCH. Alemanha, 2003.

[11] KAINER, K. U.; “Magnesium - Alloys and Technology”. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2004

[12] 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

[13] ASM METALS HANDBOOK,; “Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials”. V.02, 10<sup>th</sup> Edition, 1992.

[14] SCHAEFFER, L.; “Conformação Mecânica”. Imprensa Livre. Porto Alegre. 1999.

[15] SCHAEFFER, L.; “Problemas Práticos de Conformação Mecânica”. Expansão Editorial. Porto Alegre, 1997.

[16] SCHAEFFER, L., ROCHA, A. S.; “Conformação Mecânica – Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação”. Imprensa Livre. Porto Alegre, 2007.

[17] SWIOSTEK, J.; GOKEN, J.; LETZIG, D.; KAINER, K. U.; “Hydrostatic extrusion of commercial magnesium alloys at 100 °C and its influence on grain refinement and mechanical properties”. Materials Science and Engineering A, v424, pg. 223–229, 2006.

[18] BUSSIBA, A., BEN ARTZY, A.; SHTECHMANN, A.; IFERGAN, S.; KUPIEC, M.; “Grain refinement of AZ31 and ZK60 Mg alloys towards superplasticity studies”. Materials Science Engineering A, V.302, pg. 56–62, 2001.

[19] FIGUEIREDO, R. B., BEYERLEIN, I. J., ZHILYAEV, A. P., LANGDON, T. G.; “Evolution of texture in a magnesium alloy processed by ECAP through dies with different angles”. Materials Science & Engineering A, Structural Materials: properties, microstructure and processing, v. 527, pg. 1709-1718, 2010.

[20] FIGUEIREDO, R. B.; LANGDON, T. G.; “Grain refinement and mechanical behavior of a magnesium alloy processed by ECAP”. *Journal of Materials Science*, v. 45, p. 4827-4836, 2010.

[21] CHEN, Q., ZHAO, Z., SHU, S., ZHAO, Z. Microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy prepared by compound extrusion. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, i. pg 10–11, 2011.

[22] SHAHZAD, M.; WAGNER, L.; “Influence of extrusion parameters on microstructure and texture developments, and their effects on mechanical properties of the magnesium alloy AZ80”. *Materials Science and Engineering A*, v506, pg 141–147, 2009.

[23] ASM METALS HANDBOOK, “Heat Treatment”. V.04, 10<sup>th</sup> Edition, 1992.

[24] UEMATSU, Y., TOKAJI, K., MATSUMOTO, M.; “Effect of aging treatment on fatigue behaviour in extruded AZ61 and AZ80 magnesium alloys”. *Journal Materials Science and Engineering A* V 517, pg 138-145, 2009.

[25] BEHRENS, B.A., SCHMIDT, I.; “Improving the properties of forged magnesium parts by optimized process parameters”. *Journal of Materials Processing Technology* 188, pg. 761–765, 2007.

[26] SANTOS, C. A. dos. “Simulação numérica da trefilação axissimétrica do aço inoxidável 420 considerando o efeito do caminho de deformação” Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. PPGEM, 2005.

[27] LIMA, D. R. S. de; “Desenvolvimento de tecnologia de forjamento de aço AISI 8640 destinado à produção de brocas de perfuração.” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. PPGEM, 2007.

[28] LENHARD JR., A. L.; Análise da influência das propriedades do material e parâmetros de processo na simulação numérica do processo de forjamento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. PPGEM, 2007.

[29] FUJIKAWA, S.; “Application of CAE for hot-forging of automotive components”. *Journal of Materials Processing Technology*, v.98, p. 176-181, 2000.

[30] SCHAEFFER, L., BRITO, A. M. G., GEIER, M.; “Numerical simulation using finite elements to develop and optimize forging process”. Steel Research International, n 2/3, 2005.

[31] 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.

[32] GARCIA, A., SPIM Jr., J. A., SANTOS, C. A. dos.; “Ensaio dos Materiais”. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2000.

[33] LIMA, D. R. S. ; GOMES, T. S. ; SCHAEFFER, L. ; REIS, A. R. L. ; ROCHA, A. B. da.; “Influência do número de etapas de conformação na evolução microestrutural e nas propriedades mecânicas da liga Mg AZ61 forjada”. Anais da 15ª Conferência internacional de Forjamento/BR. Porto Alegre, 2011.

[34] SHAH, K. P.; “The Handbook on Mechanical Maintenance”. Disponível em <http://practicalmaintenance.net/?p=1051> acessado em 15 de agosto de 2011.

---