

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

IVO FREDERICO DOS SANTOS NASCIMENTO

**PROCESSO DE FORJAMENTO UTILIZANDO
A LIGA DE MAGNÉSIO ZK60**

Juiz de Fora

2019

IVO FREDERICO DOS SANTOS NASCIMENTO

**PROCESSO DE FORJAMENTO UTILIZANDO
A LIGA DE MAGNÉSIO ZK60**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

dos Santos Nascimento, Ivo Frederico.

PROCESSO DE FORJAMENTO UTILIZANDO
A LIGA DE MAGNÉSIO ZK60 / IVO FREDERICO DOS SANTOS
NASCIMENTO. – 2019.

40 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Trabalho Final de Conclusão de Curso – UNIVERSIDADE FEDERAL
DE JUIZ DE FORA, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRO-
DUÇÃO E MECÂNICA. CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA, 2019.

1. Ligas de Magnésio. 2. Forjamento. 3. Processos de Fabricação. I.
Fortes Marcomini, Raphael, orientador. II. Título.

IVO FREDERICO DOS SANTOS NASCIMENTO

**PROCESSO DE FORJAMENTO UTILIZANDO
A LIGA DE MAGNÉSIO ZK60**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 04 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Carlos Renato Pagotto
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

"Viver é a coisa mais rara do mundo. A maioria das pessoas apenas existe."

Oscar Wilde

RESUMO

Na engenharia cada vez mais se buscam materiais com boa relação resistência peso, permitindo melhor desempenho na sua aplicação e ganho de eficiência energética. O magnésio tem se mostrado como um material que atende essa necessidade, principalmente por existir em boas quantidades na crosta terrestre e nos oceanos. Diversos tipos de ligas de magnésio foram desenvolvidas com objetivo de se melhorar as características mecânicas em relação ao magnésio puro. Neste trabalho realizou-se o processo de forjamento, com uma prensa manual, utilizando a liga de magnésio ZK60. As amostras foram forjadas em diferentes temperaturas. Utilizando um método gráfico foi possível estimar a pressão de forjamento exercida pela prensa manual, com valores variando de 35 a 67 MPa e deformações de 0,043 até 0,191. Observou-se que quanto maior a temperatura escolhida para o forjamento, menor foi a dureza obtida na amostra. Os valores de dureza das amostras variaram de 58 a 68 na escala Vickers, nenhuma das amostras superou o material original na questão de dureza. Através da microscopia ótica foi possível verificar indícios de recristalização a medida que a temperatura de forjamento aumentava.

Palavras-chave: Ligas de Magnésio. Forjamento. Processos de Fabricação.

ABSTRACT

In the engineering field, it is increasingly sought materials with a good strength -weight ratio, which allows a better performance in its application and gain in energy efficiency. Magnesium has been showing to be a material that meet this need, especially because there are many resources on the Earth's crust and in the ocean. Several magnesium alloys have been developed aiming at better mechanical properties compared to pure magnesium. In this work, a forging process was made using a manual press using a magnesium alloy ZK60. The samples were forged under different temperatures. Using a graphic method, it was possible to estimate the forge pressure exerted by the manual press, with values ranging from 35 to 67 MPa and deformations from 0.043 to 0.191. It was observed that as the temperature chosen for the forge increased, the hardness obtained in the sample decreased. The hardness values of the samples ranged from 58 to 68 on the Vickers scale, none of the samples exceeded the original material in the matter of hardness. Through the optical microscopy it was possible to verify evidences of recrystallization as the forge temperature increased.

Key-words: Magnesium Alloy. Forging. Manufacturing Processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Evolução da produção anual de ligas de magnésio [3] | 13 |
| Figura 2 – Perfil da produção mundial de magnésio [6] | 15 |
| Figura 3 – Identador piramidal de dureza Vickers. | 22 |
| Figura 4 – Tarugo da liga de magnésio ZK60. | 23 |
| Figura 5 – Forno mufla SPLabor modelo SP1200. | 24 |
| Figura 6 – Ferramenta utilizada no forjamento em matriz aberta. | 25 |
| Figura 7 – Prensa manual do tipo parafuso. | 25 |
| Figura 8 – Curvas de tensão-deformação para diversas temperaturas de forjamento da liga ZK60 [15] | 26 |
| Figura 9 – Medidor de dureza Vickers | 27 |
| Figura 10 – Microscópio ótico Olympus modelo BX51M | 27 |
| Figura 11 – Amostra 3 em combustão (a) | 28 |
| Figura 12 – Amostra 3 em combustão (b) | 28 |
| Figura 13 – Amostra 1 após o forjamento | 29 |
| Figura 14 – Amostra 2 após o forjamento | 29 |
| Figura 15 – Amostra 4 após o forjamento | 30 |
| Figura 16 – Gráfico das deformações e intervalos de pressões de forjamento para liga ZK60. | 31 |
| Figura 17 – Amostra 1 (320 °C) - seção transversal | 33 |
| Figura 18 – Amostra 1 (320 °C) - superior | 33 |
| Figura 19 – Amostra 2 (345 °C) - seção transversal | 34 |
| Figura 20 – Amostra 2 (345 °C) - superior | 34 |
| Figura 21 – Amostra 4 (375 °C) - seção transversal | 35 |
| Figura 22 – Amostra 4 (375 °C) - superior | 35 |
| Figura 23 – Material original - superior | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Propriedades do magnésio puro [8] (editado pelo autor) | 16 |
| Tabela 2 – Elementos de liga e seus efeitos [10] | 18 |
| Tabela 3 – Classificação dos elementos de liga (ASTM) | 18 |
| Tabela 4 – Classificação da liga (ASTM) | 19 |
| Tabela 5 – Condição do tratamento térmico mecânico (ASTM) | 19 |
| Tabela 6 – Dimensão das amostras. | 23 |
| Tabela 7 – Temperaturas de forno das amostras. | 24 |
| Tabela 8 – Dimensão das amostras após o forjamento. | 29 |
| Tabela 9 – Deformação e pressão de forjamento estimada | 31 |
| Tabela 10 – Dureza Vickers | 32 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|--|
| ASM | American Society for Metals |
| ASTM | American Society of Testing Materials |
| HC | Hexagonal compacta |
| HV | Hardness Vickers |
| ISO | International Organization for Standardization |
| UFJF | Universidade Federal de Juiz de Fora |
| UFSJ | Universidade Federal de São João del-Rei |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------------|-------------------------------------|
| F | carga aplicada [kgf] |
| d | valor médio das diagonais [mm] |
| h_0 | altura inicial [mm] |
| h_1 | altura final [mm] |
| t | tempo [min] |
| T | temperatura [°C] |
| ε | deformação [mm/mm] |
| $\dot{\varepsilon}$ | taxa de deformação [s^{-1}] |
| σ | tensão estimada no forjamento [MPa] |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Considerações iniciais | 11 |
| 1.2 | Motivação | 11 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 11 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 | Contexto histórico e econômico do magnésio | 13 |
| 2.2 | Propriedades físicas e químicas do magnésio | 15 |
| 2.3 | Principais elementos de liga | 16 |
| 2.4 | Classificação e nomenclatura das ligas | 18 |
| 2.5 | Propriedades mecânicas das ligas de magnésio | 20 |
| 2.6 | A liga ZK60 | 20 |
| 2.7 | Propriedade mecânica de dureza Vickers | 21 |
| 2.8 | Processo de forjamento | 22 |
| 3 | METODOLOGIA | 23 |
| 3.1 | Matéria prima | 23 |
| 3.2 | Forjamento | 24 |
| 3.3 | Estimativa da tensão envolvida no forjamento | 26 |
| 3.4 | Ensaio de dureza Vickers | 26 |
| 3.5 | Microscopia ótica | 27 |
| 4 | RESULTADOS E ANÁLISES | 28 |
| 4.1 | Amostras pós forjamento | 28 |
| 4.2 | Tensão estimada | 30 |
| 4.3 | Dureza Vickers | 32 |
| 4.4 | Microscopia da liga e amostras forjadas | 32 |
| 5 | CONCLUSÕES | 37 |
| | REFERÊNCIAS | 38 |
| | ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE | 40 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A busca por novos materiais é um dos grandes desafios da engenharia atual. Desenvolver materiais leves e que também apresentem boas propriedades mecânicas tem como objetivo prover melhor eficiência energética, maior desempenho em sua aplicação e também se adequar às rígidas leis ambientais atuais. As ligas de magnésio podem ser consideradas como materiais do futuro, com um aumento substancial do consumo deste material nos últimos anos. Por ser o oitavo elemento mais abundante na crosta terra e terceiro mais comum na água do mar, a crescente demanda por magnésio não é preocupação em relação a escassez de matéria prima.

As ligas de magnésio possuem uma melhor relação resistência peso em relação à liga de alumínio, sendo muito atrativas para o setor automobilístico e aeronáutico, onde a melhoria do desempenho e a redução do consumo de combustível estão diretamente ligados a redução de peso do veículo.

Entre os processos de fabricação utilizando as ligas de magnésio a conformação mecânica tem destaque por produzir baixos índices de desperdício de material e energia, também agrega propriedades mecânicas superiores se comparada a outros processos. Forjamento, extrusão e laminação se destacam por possuir maior variabilidade de possibilidades no projeto.

1.2 Motivação

A motivação para este trabalho surgiu pelo interesse de se trabalhar com materiais, nesse caso a liga de magnésio, que estão em crescente uso na engenharia. Além de aperfeiçoar os conhecimentos práticos na área de processos utilizando os equipamentos da Faculdade de Engenharia da UFJF.

A possibilidade de se trabalhar com esse material só foi possível graças ao Eng^o Marcus Venicius Tavares Machado, que cedeu o tarugo da liga de magnésio ZK60 como parte de material excedente da sua dissertação de mestrado na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar o processo de forjamento utilizando uma liga de magnésio e avaliar sua microestrutura e propriedade mecânica em função da temperatura do processo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o forjamento do magnésio
- Estimar a pressão de forjamento exercida pela prensa manual.
- Encontrar e analisar a medida de dureza Vickers do material original e das amostras forjadas.
- Realizar e analisar a microscopia ótica do material original e das amostras forjadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto histórico e econômico do magnésio

O magnésio é um elemento químico de símbolo Mg, possui número atômico 12 (12 elétrons e 12 prótons) pertencente ao grupo 2 da tabela periódica. É o oitavo elemento mais comum na crosta terrestre, constituindo 2% dela, além disso é o terceiro elemento mais abundante na água do mar. A principal fonte de magnésio é a Magnesita, $MgCO_3$, encontrada na crosta terrestre. Sua composição química é dada por 47,8% de MgO e 52,2% de CO_2 .

A magnesita é utilizada na produção do magnésio metálico e de outros compostos de magnésio, utilizados nas indústrias farmacêutica, química e de refratários. Como subproduto da Magnesita temos o magnésio metálico, que é utilizado na obtenção das ligas de alumínio e magnésio, muito utilizados nas indústrias automotiva, aeroespacial, militar, maquinaria e ferramentas em geral [1].

O magnésio foi encontrado pela primeira vez na Grécia, região de Thessaly, sendo que o metal magnésio foi produzido pela primeira vez por Sir Humphrey Davi em 1808, em pequenas quantidades. O consumo do magnésio e suas ligas se tornou maior durante o período entre as duas guerras mundiais, na intenção da produção de material bélico. Em 1944 o consumo anual chegou a alcançar 280.000 toneladas, sendo reduzido para 10.000 toneladas por ano após o fim da guerra, voltando a crescer a partir de 1998 com o renovado interesse e novas legislações ambientais, o consumo aumentou para 360.000 toneladas por ano a um preço de US\$ 3,6 dólares por quilo [2].

De acordo com [3] a produção de magnésio cresceu mais de 2500% de 1935 a 2010, como mostrado na figura abaixo.

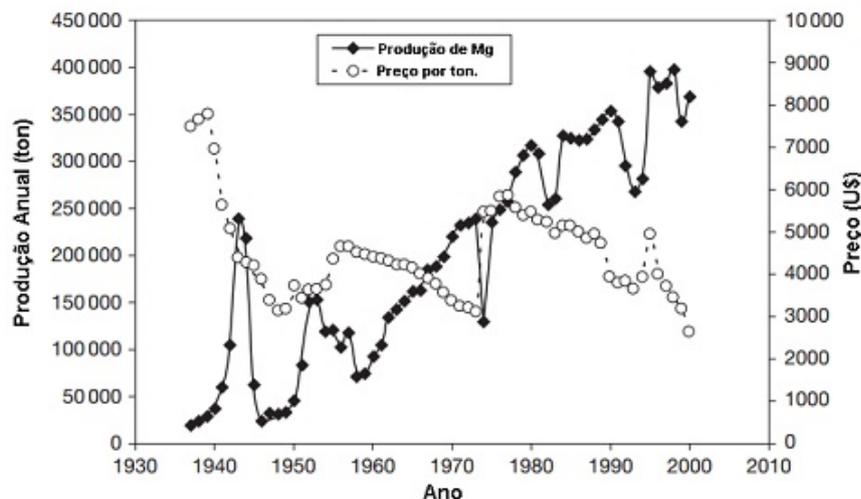


Figura 1 – Evolução da produção anual de ligas de magnésio [3]

A primeira vez que se utilizou o metal magnésio na indústria automobilística foi no modelo Volkswagen Beetle (conhecido como Fusca no Brasil) em 1930, na caixa de transmissão do veículo, feita em magnésio fundido. Com a utilização do magnésio fundido em vez de ferro fundido conseguiu-se uma redução de massa de 50 Kg, passando assim o peso do componente para 17 kg. O magnésio obteve destaque na indústria automobilística devido a economia de combustível, onde a redução do peso do veículo é de grande importância. As ligas de magnésio mostram-se uma alternativa viável e de futuro, com uma redução de peso em relação a ligas de alumínio na ordem de 33% e de 75% em relação ao ferro fundido e aços [4].

As primeiras ligas de magnésio foram já desenvolvidas no início do século XX, sendo o setor automobilístico o que mais utilizou essas ligas, podemos citar como exemplo dois veículos, o Corvette SS e a Mercedes-Benz 300SLR feitos com estruturas de magnésio, sendo que ambos foram utilizados em competições automobilísticas, entre elas a famosa de Le Mans [5].

Até metade do século XX, as ligas eram à base de Mg-Al-Zn e sistemas de Mg-Mn. Com a descoberta do zircônio e terras raras como elementos atuantes na ação modificadora e refinadora, houve um grande progresso no desenvolvimento de ligas de magnésio. As ligas de magnésio passaram a ser utilizadas em aeronaves alemãs, mas devido a alta inflamabilidade e baixa resistência a corrosão, outras ligas começaram a ser desenvolvidas para uso aeronáutico.

Nos últimos anos, devido às melhorias verificadas na produção e no desempenho mecânico das ligas de magnésio, houve um crescimento da aplicação dessas ligas nas indústrias automotiva e aeronáutica, como uma forma de redução do consumo energético do transporte e para atender às exigências ambientais relativas à emissão de gases dos combustíveis fósseis. Além do uso dessas ligas nos campos aeronáutico e automobilístico, as ligas de magnésio também formam parte da estrutura de telefones celulares, computadores, câmaras fotográficas, rodas automotivas e aparecem em peças de motocicletas e bicicletas. Para ampliar ainda mais suas aplicações, vários centros de pesquisas direcionaram suas investigações na melhoria da produção, do processamento e das propriedades das ligas, consolidando-as como potencial alternativa frente a outros metais leves e estruturais [2].

A produção mundial de magnésio sofreu uma grande modificação nos últimos 15 anos, com a migração de 90% da capacidade instalada mundialmente para a China. Das 21 empresas produtoras de magnésio não chinesas que operavam no período de 1990 a 2005, somente cinco continuam operando atualmente, com capacidade instalada conjunta de apenas 160.000 ton/ano, equivalente a apenas 12% da capacidade instalada mundial. A capacidade instalada mundial para produção de magnésio atingiu em 2008, 1,3 milhões de toneladas, mas o fator de utilização desta capacidade foi de somente de 50% em 2008. Em 2008 a produção mundial de magnésio apresentou uma redução de 9% em relação ao ano

anterior o primeiro recuo registrado na produção do metal em uma década, crise de 2008. O governo chinês, concede incentivos para o crescimento e modernização da indústria de magnésio. Existe na China uma cadeia formada por empresas, Universidades e Centro de Pesquisa trabalhando em conjunto para melhorar processos e desenvolver novos produtos e tecnologias para a indústria de magnésio [4]

A atual produção de magnésio está distribuída da seguinte forma, conforme e a figura abaixo.

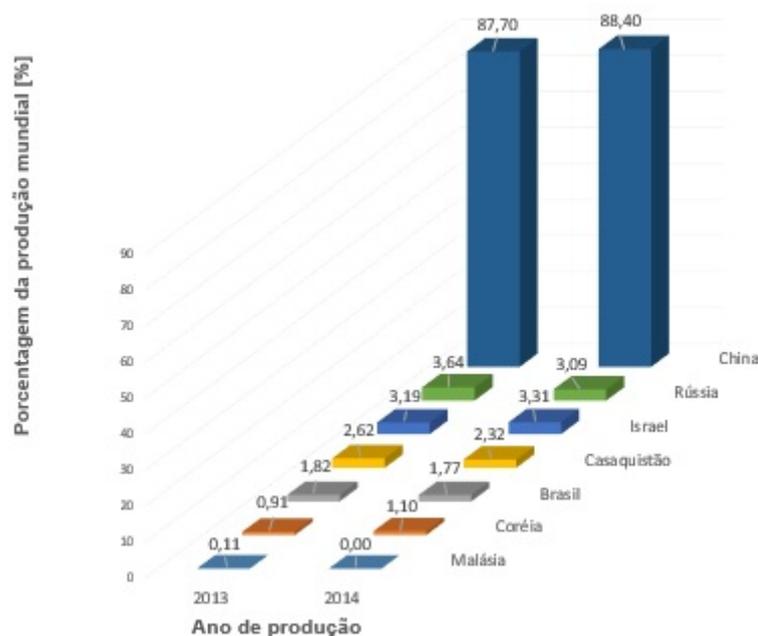


Figura 2 – Perfil da produção mundial de magnésio [6]

Mesmo não sendo o maior produtor mundial, as jazidas de magnésio encontradas no Brasil são consideradas como uma das melhores do mundo em termos de qualidade. Existem jazidas de Magnesita ($MgCO_3$) no Ceará (Orós e Cariús) e na Bahia (Brumado). Junto com o potássio, é encontrado em abundância na bacia salífera de Sergipe, grandes reservas de dolomita existem no Paraná e em São Paulo [1].

A RIMA Industrial com capacidade instalada de 22.000 t/ano é o único produtor de magnésio metálico, ligas de magnésio e magnésio em pó na América Latina, operando há mais de 30 anos em um processo silicotérmico de elevada eficiência. Possui planos de continuar crescendo sua produção de magnésio de maneira modular, atendendo as necessidades do mercado nacional [7].

2.2 Propriedades físicas e químicas do magnésio

As ligas de magnésio tem ganhado atenção devido ao fato do magnésio apresentar um boa relação resistência/peso. Considerado como um material estrutural leve, com ponto

de fusão de 650 °C e estrutura cristalina hexagonal compacta (HC), tais características afetam as propriedades fundamentais de suas ligas. Logo abaixo está uma tabela com as principais propriedades do magnésio puro em comparação com o alumínio puro.

| Propriedade | Magnésio | Alumínio |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Cor | Cinza prateado | Cinza prateado |
| Estrutura cristalina | HC | CFC |
| Massa específica (temp. amb.) | 1,738 g cm ⁻³ | 2,697 g cm ⁻³ |
| Temperatura de fusão | 650 ± 5 °C | 660, 32 °C |
| Temperatura de ebulição | 1107 ± 10 °C | 2518, 35 °C |
| Capacidade calorífica (20 °C) | 1,05 KJ (Kg K) ⁻¹ | 0,90 KJ (Kg K) ⁻¹ |
| Calor de fusão | 370 ± 15 KJ Kg ⁻¹ | 397, 75 KJ Kg ⁻¹ |
| Módulo de elasticidade | 45 GPa | 68 GPa |

Tabela 1 – Propriedades do magnésio puro [8] (editado pelo autor)

A alta inflamabilidade é uma característica a se destacar do magnésio e suas ligas. Quando pulverizado e exposto ao ar, se inflama produzindo uma chama branca intensa, rica em raios ultravioleta. O magnésio é um grande agente redutor e reage com vários ácidos, produzindo hidrogênio. Reage rapidamente, com liberação de calor, em contato com o ar ou água, motivo pelo qual deve ser manipulado com precaução. O fogo produzido pelo magnésio, portanto, não deve ser contido através do uso de água.

O incêndio ocorrido por magnésio é classificado como incêndio de classe D, queima de substâncias pirofosfóricas. Piroforicidade é a tendência que um determinado material tem de reagir com o ambiente e entrar em combustão quando ele se encontra na forma de partículas finas. Tal propriedade faz com que esses materiais entrem em combustão mesmo sem que haja uma fonte clara de ignição. Os incêndios de classe D não podem ser extinguidos com água, já que esse tipo de substância até agrava o problema. Por conta disso, a melhor forma de acabar com esse tipo de incêndio são os extintores de incêndio de classe D, que são capazes de depositar nas chamas agente extintor à base de sais especiais, que são capazes de isolar o metal do oxigênio, levando ao resfriamento e, conseqüentemente, a rápida extinção das chamas [9].

2.3 Principais elementos de liga

Diversos elementos são utilizados atualmente para a produção de ligas de magnésio. Os elementos de liga mais comuns são o alumínio, zircônio, zinco, manganês, terras raras, cálcio, berílio, silício, prata e tório. Estes são adicionados ao magnésio com o objetivo de obter melhores características mecânicas para uso estrutural. A tabela a seguir mostra os principais elementos de liga e seus efeitos.

| Elemento de liga | Efeitos |
|------------------|--|
| Alumínio | Desde os anos 20 o alumínio se tornou o principal elemento de liga por aumentar significativamente o limite de resistência através da formação da fase $Mg_{17}Al_{12}$. O alumínio aumenta a fundibilidade principalmente em ligas para fundição sob pressão. Aumenta também a faixa de solidificação facilitando a fundição. Quando presente em teores maiores que 6% em peso, torna a liga tratável termicamente, porém ligas comerciais dificilmente ultrapassam 10% de alumínio. |
| Zinco | É o segundo elemento de liga 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. Em conjunto com zircônio e terras raras ou tório produz endurecimento por precipitação. O zinco auxilia na diminuição do efeito deletério do ferro e níquel sobre a resistência à corrosão. |
| Terras Raras | Terras raras aumentam a resistência à alta temperatura. Geram precipitados na região de contornos de grãos aumentando a resistência à fluência. Também diminuem a formação de trincas e porosidades em fundidos por diminuir a faixa de temperaturas de solidificação. 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. |
| Silício | Aumenta a fluidez do banho aumentando a fundibilidade, porém, diminui a resistência à corrosão com ferro presente. |
| Prata | Facilita o tratamento de envelhecimento. |
| Tório | Aumenta a resistência à fluência em temperaturas até 370 °C e melhora a soldabilidade de ligas contendo zinco. |
| Cálcio | É adicionado imediatamente antes do vazamento em fundidos para redução de oxidação da liga. Atua também como redutor da oxidação no tratamento térmico. Age ainda como refinador de grão. |

| continuação | |
|-------------------------|--|
| Elemento de liga | Efeitos |
| Berílio | Apresenta pequena solubilidade porém, adições na ordem de 0,001% em peso, diminuem a tendência à oxidação superficial durante processos de fusão. Pode promover o crescimento de grão em ligas fundidas em areia. |
| Manganês | Adições de manganês não afetam a resistência máxima porém, resultam um pequeno aumento na tensão de escoamento. A função principal é aumentar a resistência à corrosão em água do mar em ligas Mg-Al e Mg-Al-Zn por combinar-se com ferro e outros metais pesados. |
| Zircônio | O zircônio tem efeito de refinador de grão em ligas de magnésio. Acredita-se que a proximidade do parâmetro de rede do zircônio com magnésio permite que precipitados ricos em zircônio formados durante a solidificação, atuem como local de nucleação heterogênea para o magnésio. |
| Ítrio | Apresenta solubilidade de até 12,4% em peso com magnésio. É adicionado em conjunto com outras terras raras para aumentar a resistência à fluência em temperatura até 300 °C. |
| Estanho | Quando utilizado em conjunto com alumínio, aumenta a ductibilidade da liga e facilita o forjamento, pois diminui a tendência a trincas a quente. |

Tabela 2 – Elementos de liga e seus efeitos [10]

2.4 Classificação e nomenclatura das ligas

O sistema utilizado para a nomenclatura das ligas de magnésio é o da ASTM (American Society of Testing Materials), onde se usa uma letra para para cada elemento de liga, conforme tabela abaixo.

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

Tabela 3 – Classificação dos elementos de liga (ASTM)

As duas primeiras letras indicam os dois elementos majoritários presentes na liga, que

são seguidas por dois números que indicam, respectivamente, sua porcentagens em peso arredondadas.

Tomando como exemplo a liga ZK61, ela possui, de acordo com a norma ASTM, 6% em peso de zinco (Z) e 1% em peso de zircônio (K), enquanto a ZK60 possui 6% de zinco e até 0,5% de zircônio.

Um terceiro caractere indica uma alteração de um primeiro tipo existente de liga, sendo diferenciadas por letras situadas após o primeiro conjunto de letras e números com relação a uma designação e ordem de registro, seja por grau de pureza, resistência a corrosão ou outros.

| Letra | Designação |
|--------------|-------------------------------------|
| A | primeira liga registrada na ASTM |
| B | segunda liga registrada na ASTM |
| C | terceira liga registrada na ASTM |
| D | liga de alta pureza |
| E | liga de alta resistência a corrosão |
| X1 | liga não registrada na ASTM |

Tabela 4 – Classificação da liga (ASTM)

O quarto caractere da classificação mostra o tipo de tratamento térmico mecânico que foi realizado na liga, como mostrado na tabela a seguir.

| Símbolo | Condição |
|----------------|--|
| 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 artificial |
| T6 | Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial |
| T8 | Tratamento térmico de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento artificial |

Tabela 5 – Condição do tratamento térmico mecânico (ASTM)

Assim, um exemplo de uma liga de magnésio utilizando a nomenclatura da ASTM, para a liga ZK60 A T6, fica da seguinte forma:

- Z - elemento de liga majoritário (zinco);
- K - elemento de liga majoritário (zircônio);
- 6 - percentual do elemento de liga majoritário zinco (6% de zinco);
- 0 - percentual de elemento de liga majoritário zircônio (0,45% de zircônio);
- A - primeira liga registrada na ASTM;
- T6 - tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial;
- o restante presente corresponde ao magnésio.

2.5 Propriedades mecânicas das ligas de magnésio

A estrutura cristalográfica do magnésio puro é a hexagonal compacta. Em aplicação de engenharia, é comum o uso de ligas de magnésio para conferir um aumento da resistência mecânica, quando a liga é exigida mecanicamente em temperatura ambiente a mesma apresenta pequena deformação até a fratura, sendo esta uma característica típica de ligas frágeis [10].

As ligas de magnésio possuem boa capacidade de amortecimento, característica interessante nos materiais utilizados na indústria aeronáutica e automobilística. O alto amortecimento reduz vibrações causadas pela deformação plástica e elástica, consequentemente, reduzindo o ruído [10].

Os produtos fabricados com as ligas de magnésio possuem propriedades mecânicas e ductilidade variada. Isso se deve aos diferentes elementos de liga bem como o fato de muitas das ligas serem tratadas termicamente. Outros fatores que influenciam as propriedades mecânicas se devem essencialmente aos parâmetros adotados durante o processo, tais como: temperatura, velocidade de resfriamento e taxa de deformação entre outros, inerentes desde o processo de fusão até o destino final da peça [4].

O magnésio possui dureza suficiente para algumas aplicações estruturais, exceto aquelas que envolvam abrasão severa. Embora haja uma grande variação de dureza entre as ligas de magnésio, a sua resistência abrasão varia apenas de 15 a 20% [10].

O valor do módulo de elasticidade (E) do magnésio e suas ligas é de 45 GPa a temperatura ambiente, e o módulo de cisalhamento (G) é de 16,5 GPa, com um coeficiente de Poisson de 0,35 [4].

2.6 A liga ZK60

A liga ZK60 constitui-se em uma matriz de magnésio, com uma porcentagem em peso nominal de 6% de Zinco (Zn) e 0,45% de zircônio (Zr). Seu limite de escoamento

pode chegar a 382 MPa. Esta liga é suscetível a trincas durante sua solidificação e possui uma baixa soldabilidade, que pode ser originada devido a precipitação de $Mg_{51}Zn_{20}$ ao longo dos contornos de grão na zona de fusão [11].

A liga utilizada neste trabalho ainda contém 1,5% em peso de mischmetal que é um subproduto de terras raras que possui uma composição de aproximadamente 25% de La, 50% de Ce, 6% de Pr, 15% de Nd, 3% de Fe e 1% de impurezas, com um ponto de fusão na faixa de 800 °C. Quando adicionado a uma liga de magnésio, ele provê a esta liga melhores propriedades mecânicas, por exemplo, melhoria na resistência a altas pressões. O termo terras raras é utilizado para designar os elementos da tabela periódica compreendidos entre o lantânio (La) e o lutécio (Lu) onde são também incluídos o escândio (Sc) e o ítrio (Y).

A liga foi obtida através de processo de fundição sob agitação mecânica no estado semi-sólido, utilizando-se um forno resistivo munido de batedor. O tarugo após fundido, a uma temperatura de 440 °C, estando completamente sólido, foi retirado do forno fusão e resfriado em água a temperatura ambiente [4].

2.7 Propriedade mecânica de dureza Vickers

Uma propriedade mecânica a se considerar é a dureza, que mede a resistência do material a uma deformação plástica local. Os primeiros ensaios de dureza eram baseados em minerais naturais com uma escala construída somente com base na capacidade de um material riscar um outro que é mais macio. Ao longo dos anos foram desenvolvidas Técnicas de Dureza Quantitativas nas quais um pequeno indentador é forçado para dentro da superfície de um material a ser testado, sob controladas condições de carga e de taxa de aplicação. É medida a profundidade ou o tamanho da indentação resultante que por sua vez é relacionada(o) ao número de dureza; quanto mais macio o material, tanto maior e mais profunda a indentação e tanto menor o número índice de dureza. Durezas medidas são apenas relativas (em vez de absolutas) e cuidado deve ser exercido ao se comparar valores determinados por diferentes técnicas [12].

O ensaio de dureza Vickers consiste em aplicar uma carga utilizando um indentador em forma de pirâmide de diamante com base quadrangular e ângulo de 136°, como mostra a figura a seguir. A impressão resultante é observada e medida através de um microscópio, sendo convertida em um número de dureza (HV) utilizando a seguinte equação:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 * F * \text{sen} \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 1,8544 * \frac{F}{d^2} \quad (2.1)$$

Onde:

HV: número de dureza Vickers;

F: carga aplicada [kgf];

d: valor médio das diagonais impressas na amostra [mm].

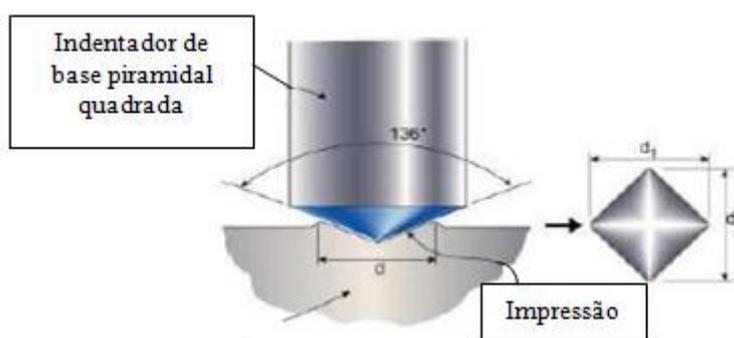


Figura 3 – Indetador piramidal de dureza Vickers.

2.8 Processo de forjamento

O forjamento é o processo de conformação mecânica através do martelamento ou prensagem. No primeiro, golpes rápidos e sucessivos são aplicados no metal, já no segundo, o metal fica sujeito à ação da força de compressão a baixa velocidade. Assim, no forjamento por martelamento, a pressão atinge a máxima intensidade quando o martelo toca o metal, decrescendo rapidamente a seguir de intensidade, à medida que a energia do golpe é absorvida na deformação do metal. Na prensagem, atinge-se o máximo valor da pressão pouco antes que ela seja retirada [13].

O processo de forjamento subdivide-se em duas categorias: forjamento livre, ou em matriz aberta, e forjamento em matriz fechada, conhecido apenas como forjamento em matriz.

No processo de forjamento livre o material é deformado entre ferramentas planas ou de formato simples. O processo de deformação é efetuado por compressão direta e o material escoar no sentido perpendicular à direção de aplicação da força (caminho de menor atrito). Esse processo é usado geralmente para grandes peças, ou quando o número a ser produzido é pequeno não compensando a confecção de matrizes caras. Frequentemente o forjamento livre é usado para pré-conformar a peça para forjamento em matriz.

No forjamento em matriz o material é deformado entre duas metades de matrizes, que fornecem a forma desejada à peça. A deformação ocorre sob alta pressão em uma cavidade fechada e, assim, se obtém peças forjadas com tolerâncias dimensionais mais estreitas. É necessário um grande volume de produção de peças para justificar as matrizes de elevado custo [14].

3 METODOLOGIA

3.1 Matéria prima

A matéria prima para o forjamento foi retirada de uma tarugo de seção retangular da liga de magnésio ZK60. O tarugo apresenta uma trinca de solidificação na sua superfície externa, como mostra a figura 4.



Figura 4 – Tarugo da liga de magnésio ZK60.

A formação de trincas localizadas nas partes externas do tarugo retangular são originadas dos cantos vivos presentes, onde a solidificação se inicia e o resfriamento ocorre rapidamente não deixando o metal contrair durante a mudança de fase líquido para sólido.

Foram retiradas quatro amostras do tarugo, as amostras possuem as seguintes dimensões:

| Amostra | altura[mm] | largura[mm] | espessura[mm] |
|---------|------------|-------------|---------------|
| 1 | 7 | 21,2 | 16,4 |
| 2 | 8,9 | 21,3 | 16,2 |
| 3 | 7,3 | 21,3 | 16,2 |
| 4 | 6,0 | 21,2 | 17,3 |

Tabela 6 – Dimensão das amostras.

3.2 Forjamento

Para o processo de forjamento, primeiramente utilizou-se um forno mufla para aquecer cada uma das quatro amostras em temperaturas diferentes.



Figura 5 – Forno mufla SPLabor modelo SP1200.

De acordo com [15] a faixa de temperaturas para realizar o forjamento da liga de magnésio ZK60 é de 290 - 385 °C. A temperatura (T) e o tempo de forno (t) para cada amostra está na tabela 7. Para o primeiro forjamento definiu-se a tempo de forno de 25 min, porém para garantir que a amostra atingisse a temperatura indicada pelo forno optou-se para tempo de forno de 30 min no segundo forjamento. No terceiro forjamento tentou-se aumentar para 35 min o tempo de forno, mas devido problemas no processo (relatados no capítulo de resultados) manteve-se o tempo de 30 min para o quarto forjamento.

| Amostra | T [°C] | t [min] |
|---------|--------|---------|
| 1 | 320 | 25 |
| 2 | 345 | 30 |
| 3 | 385 | 35 |
| 4 | 375 | 30 |

Tabela 7 – Temperaturas de forno das amostras.

Como o objetivo é forjar apenas quatro amostras, o processo escolhido foi o de forjamento em matriz aberta, utilizando ferramental de aço 1050 já existente no Laboratório de Processos da UFJF. As ferramentas foram aquecidas juntamente com as amostras no forno, para evitar perda de calor entre a amostra e a ferramenta durante o processo de forja.



Figura 6 – Ferramenta utilizada no forjamento em matriz aberta.

Após serem retiradas do forno, cada amostra era colocada imediatamente na prensa, juntamente com o ferramental. As amostras eram prensadas até que não houvesse mais deformação. Para realizar a forja foi utilizada uma prensa manual do tipo parafuso do Laboratório de Processos da UFJF. Depois de forjadas, as amostras eram resfriadas na temperatura ambiente.



Figura 7 – Prensa manual do tipo parafuso.

3.3 Estimativa da tensão envolvida no forjamento

A previsão de cargas e tensões no forjamento é um processo complexo, com variáveis que variam continuamente durante o processo. Por causa dessas dificuldades encontradas as cargas e tensões são geralmente estimadas com base em procedimentos empíricos. Neste trabalho utilizou-se um gráfico (figura 8) de tensão e deformação para diversas temperaturas de forjamento da liga ZK60 sugerido por [15]. Na figura 8 a coluna da temperatura indica a temperatura na qual a amostra deve ser aquecida e, conseqüentemente, a temperatura que o processo deve ocorrer.

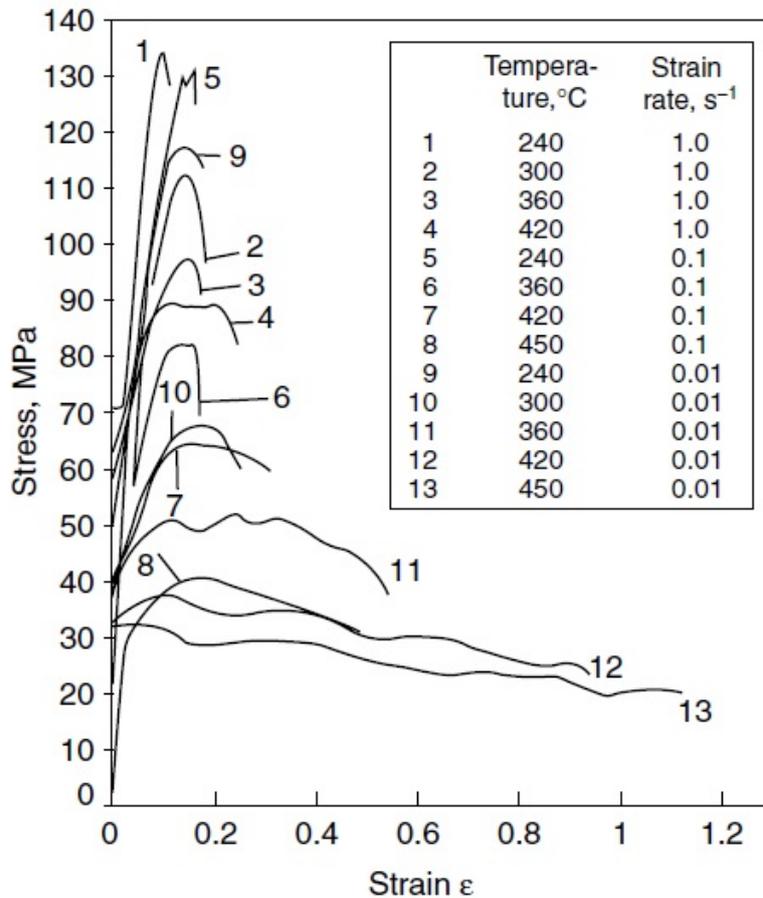


Figura 8 – Curvas de tensão-deformação para diversas temperaturas de forjamento da liga ZK60 [15]

3.4 Ensaio de dureza Vickers

Para este ensaio foi utilizada a norma ISO 6507-1:2018, que define um indentador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada e ângulo de 136°.

Antes da realização do ensaio as amostras passaram por um processo de lixamento cujo o objetivo é deixar a superfície mais limpa e uniforme para a realização do ensaio de dureza. A seguinte série de lixas foi utilizada em cada amostra: 220, 400, 600, 1200.

A carga utilizada no ensaio foi de 60 kgf, foram realizados seis ensaios em cada amostra, o resultado da medida de dureza Vickers foi a média desses seis ensaios. O Equipamento utilizado foi o medidor de dureza Vickers, do Laboratório de Resistência dos Materiais da UFJF.



Figura 9 – Medidor de dureza Vickers

3.5 Microscopia ótica

As amostras passaram por uma inspeção de microscopia ótica utilizando o microscópio modelo Olympus BX51M disponível no Laboratório de Manufatura Aditiva da UFJF.

Primeiro realizou-se o processo de lixamento das amostras, a seguinte série de lixas foi utilizada em cada amostra: 220, 400, 600, 1200. Após lixadas, as amostras foram polidas utilizando uma politriz com solução de alumina, por fim realizou-se um ataque químico com nital durante 4 s para se obter maior nitidez na análise microestrutural.



Figura 10 – Microscópio ótico Olympus modelo BX51M

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Amostras pós forjamento

Após forjadas as amostras tiveram suas dimensões medidas novamente através do uso de um paquímetro.

A amostra 3, que foi aquecida na temperatura limite (385 °C) indicada na literatura, logo após ser retirada do forno apresentava coloração extramente avermelhada entrando em combustão antes mesmo do processo de forja. Como dito na seção 2.2 deste trabalho, o magnésio reage rapidamente em contato com ar ou água, sua chama deve ser extinta através de uso do extintor do tipo D. Por ser uma amostra de dimensões muito pequenas, a amostra foi colocada ao ar livre até que a reação se extinguísse, cessando a liberação de calor.



Figura 11 – Amostra 3 em combustão (a)



Figura 12 – Amostra 3 em combustão (b)

As amostras 1, 2 e 4 foram forjadas normalmente, apresentando as seguintes dimensões após o processo:

| Amostra | altura[mm] | largura[mm] | espessura[mm] |
|---------|------------|-------------|---------------|
| 1 | 6,7 | 22 | 16,5 |
| 2 | 7,2 | 22,9 | 16,8 |
| 3 | X | X | X |
| 4 | 5,4 | 22 | 19,4 |

Tabela 8 – Dimensão das amostras após o forjamento.

A seguir temos as imagens das amostras 1, 2 e 4 após serem forjadas e resfriadas ao ar livre:



Figura 13 – Amostra 1 após o forjamento



Figura 14 – Amostra 2 após o forjamento



Figura 15 – Amostra 4 após o forjamento

Pelas imagens é possível observar que quanto maior foi a temperatura escolhida para o forjamento, maior foi a quantidade de trincas surgidas na amostra, causando ruptura em alguns casos.

A amostra 1 aparece com trincas na superfície superior, sem ocorrer perda de material. Na amostra 2 é possível observar no canto inferior esquerdo que ocorreu uma ruptura, causando perda de material naquela região. A amostra 4, forjada em temperatura mais alta, foi onde ocorreu o surgimento de trincas mais severas. Uma trinca no lado direito da amostra 4 propagou-se da parte superior até a parte inferior, separando a amostra em duas partes (na figura 15 as partes foram juntadas).

Esses resultados eram esperados, de acordo com [15] a liga ZK60 às vezes pode conter pequenas quantidades de mistura eutética de baixo ponto de fusão que se forma durante a solidificação do tarugo. O forjamento acima da temperatura de 315 °C - ponto de fusão da mistura eutética - pode causar ruptura severa.

4.2 Tensão estimada

De posse das alturas inicial (h_0) e final (h_1) foi possível encontrar a deformação (ε) sofrida pelas amostras. Pelos valores de deformação encontrados e pelo fato de utilizarmos um prensa manual, assumiu-se uma taxa de deformação ($\dot{\varepsilon}$) de 0,01 s⁻¹.

O gráfico fornecido por [15] não disponibiliza curvas de tensão-deformação para as temperaturas de forjamento utilizadas neste trabalho, dessa forma foi possível encontrar intervalos de pressões de forjamento para cada amostra.

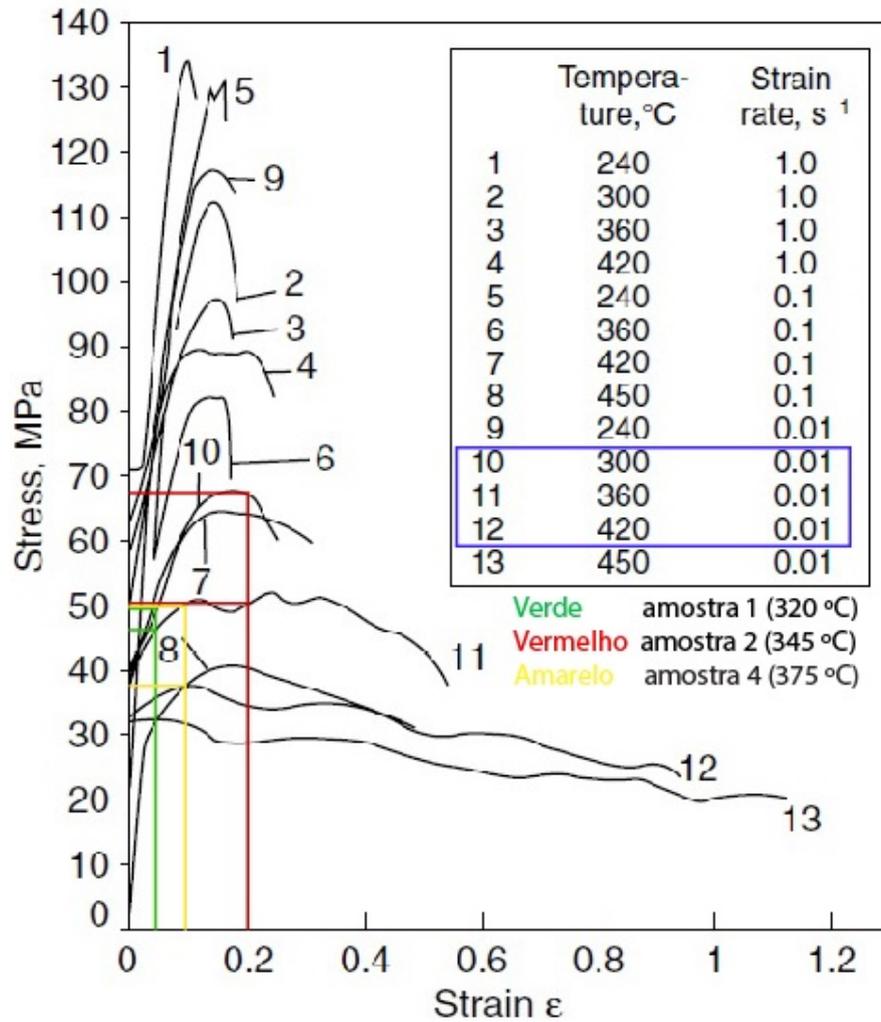


Figura 16 – Gráfico das deformações e intervalos de pressões de forjamento para liga ZK60.

A amostra 1, forjada a 320 °C, apresentou um deformação de 0,043 (linha verde) com valores de pressão de forjamento compreendidos entre as curvas 10 e 11.

A amostra 2, forjada a 345 °C, apresentou um deformação de 0,191 (linha vermelha) com valores de pressão de forjamento compreendidos entre as curvas 10 e 11.

A amostra 4, forjada a 375 °C, apresentou um deformação de 0,100 (linha amarela) com valores de pressão de forjamento compreendidos entre as curvas 11 e 12.

Na tabela 9 são exibidos os intervalos de pressão de forjamento encontrados para cada amostra.

| Amostra | T [°C] | h_0 [mm] | h_1 [mm] | ε [mm/mm] | σ [MPa] |
|---------|--------|------------|------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 320 | 7 | 6,7 | 0,043 | 46 - 50 |
| 2 | 345 | 8,9 | 7,2 | 0,191 | 50 - 67 |
| 4 | 375 | 6 | 5,4 | 0,100 | 38 - 50 |

Tabela 9 – Deformação e pressão de forjamento estimada

Era esperado que a maior deformação ocorreria na amostra 4, forjada em maior temperatura (375 °C), porém a maior deformação ocorreu na amostra 2, forjada na temperatura intermediária (345 °C). Uma possível explicação seria que, durante o processo de forja da amostra 4, a montagem da amostra na matriz levou mais tempo, devido a um deslocamento da ferramenta superior. Esse intervalo maior de tempo entre a retirada do forno e o processo de forja pode ter feito a amostra 4 perder mais calor que as outras duas amostras.

Neste trabalho a maior dificuldade encontrada foi em manter a peça aquecida durante o processo de forjamento, a solução mais razoável para isso foi aquecer o ferramental juntamente com a amostra no forno. Métodos mais eficazes, como o utilizado por [17], incluem resistências elétricas inseridas na parte interna superior e inferior da ferramenta. Dessa forma, logo a após ser retirada do forno, a peça é colocada na ferramenta que está em temperatura controlada. Garantindo-se assim que o processo ocorrerá na temperatura de forjamento desejada.

4.3 Dureza Vickers

A tabela a seguir mostra os valores de dureza Vickers (HV) encontrados para cada amostra após o forjamento e para liga ZK60 em seu estado original.

| Amostra | T [°C] | HV |
|----------------|---------------|-----------|
| original | X | 80 |
| 1 | 320 | 68 |
| 2 | 345 | 60 |
| 4 | 375 | 58 |

Tabela 10 – Dureza Vickers

Pela tabela é possível notar que quanto maior a temperatura escolhida para o forjamento, menor foi a dureza obtida na amostra, um comportamento semelhante foi encontrado por [17] no forjamento da liga de magnésio AZ61. As amostras 2 e 4 obtiveram valores bem semelhantes. As temperaturas mais altas, principalmente em 4, propiciaram a recristalização dos grãos da liga, diminuindo a dureza. O valor de dureza Vickers para o material original também está de acordo com os valores encontrados por [4] e [16].

4.4 Microscopia da liga e amostras forjadas

Nas figuras 17 a 23 estão as imagens obtidas através do microscópio ótico. Para o material original realizou-se a microscopia da parte superior. Para as amostras forjadas realizou-se a microscopia da parte superior e de sua seção transversal.

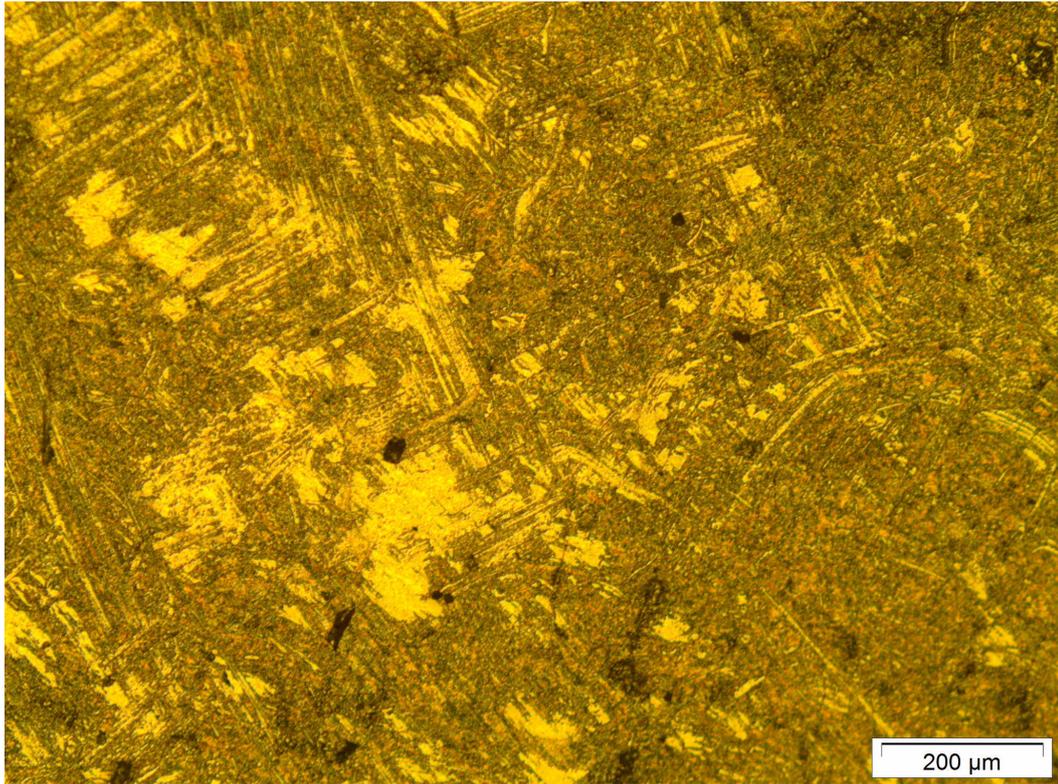


Figura 17 – Amostra 1 (320 °C) - seção transversal

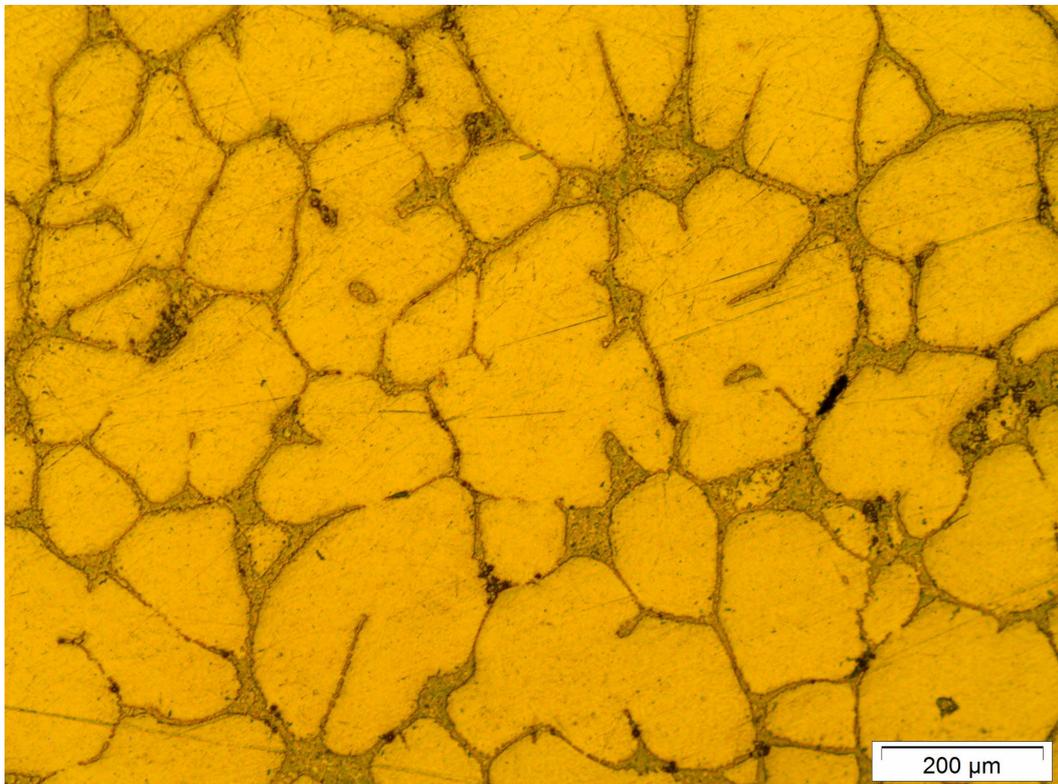


Figura 18 – Amostra 1 (320 °C) - superior

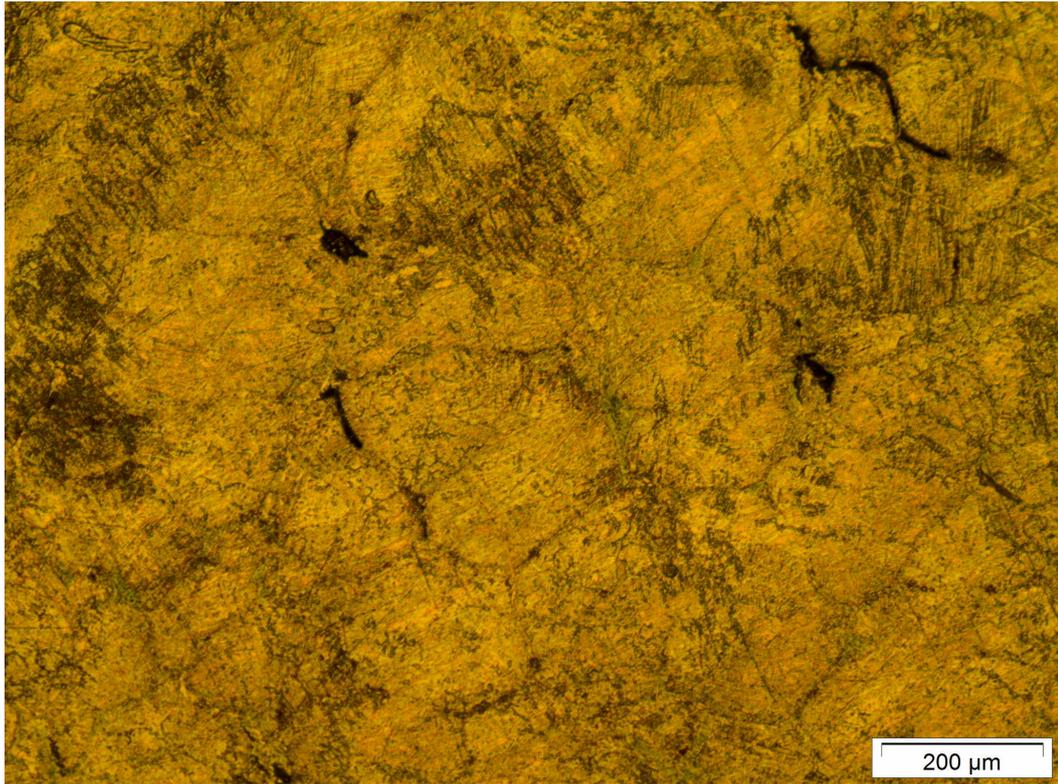


Figura 19 – Amostra 2 (345 °C) - seção transversal

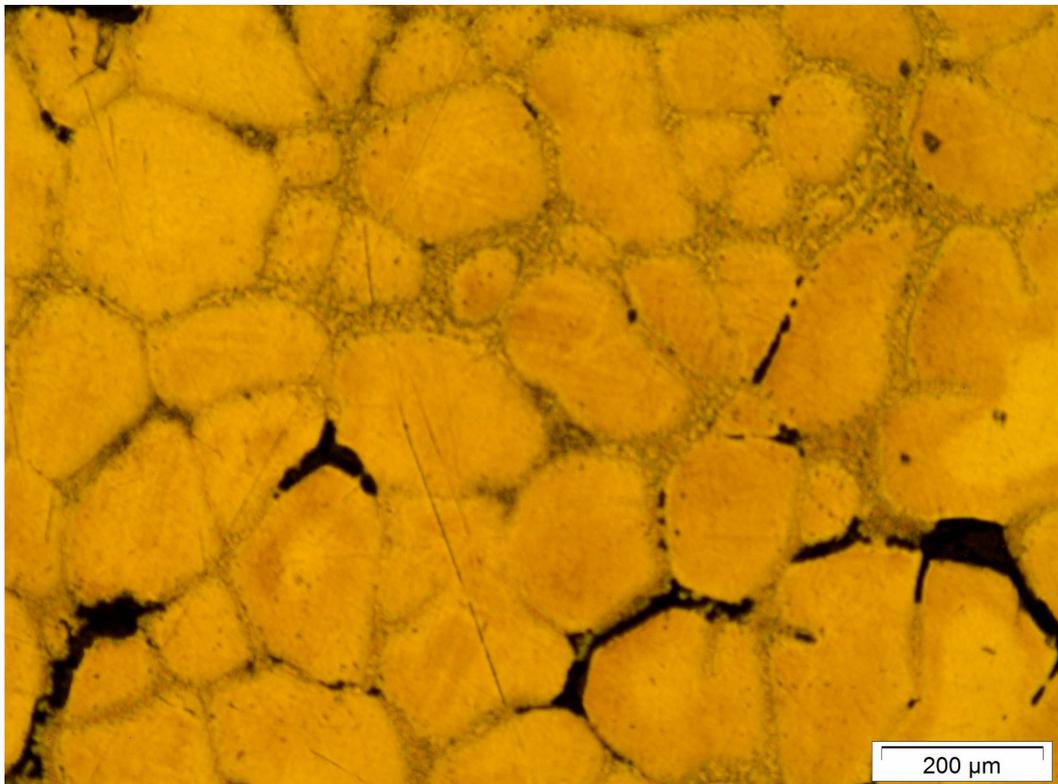


Figura 20 – Amostra 2 (345 °C) - superior

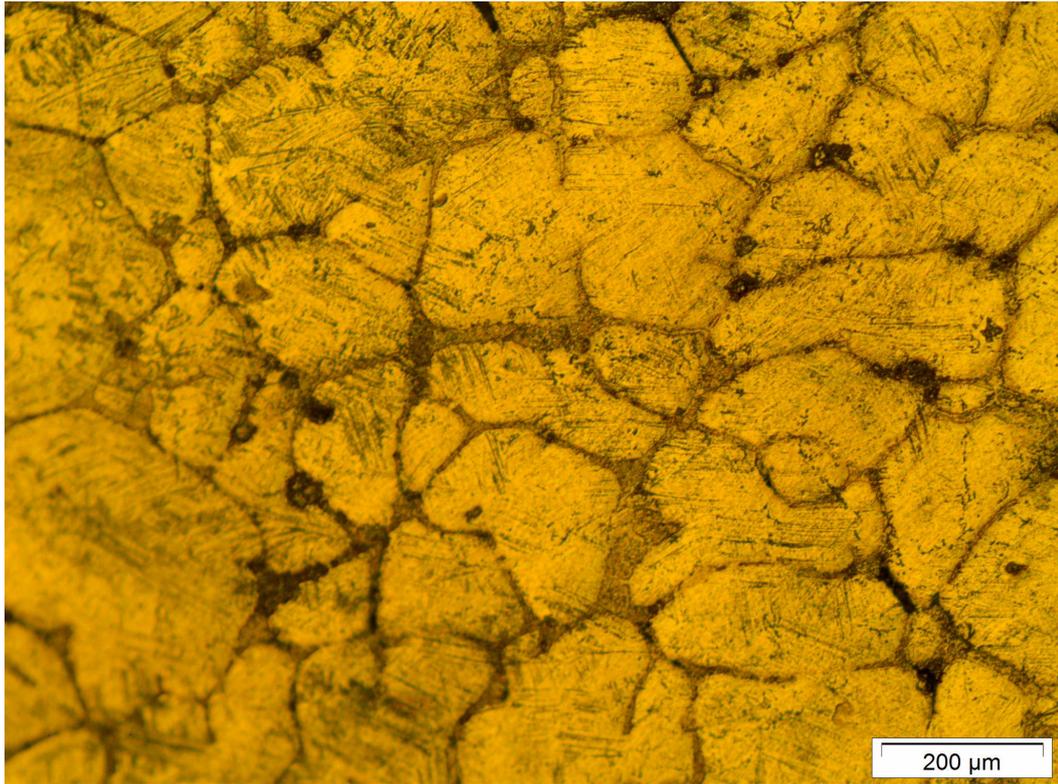


Figura 21 – Amostra 4 (375 °C) - seção transversal

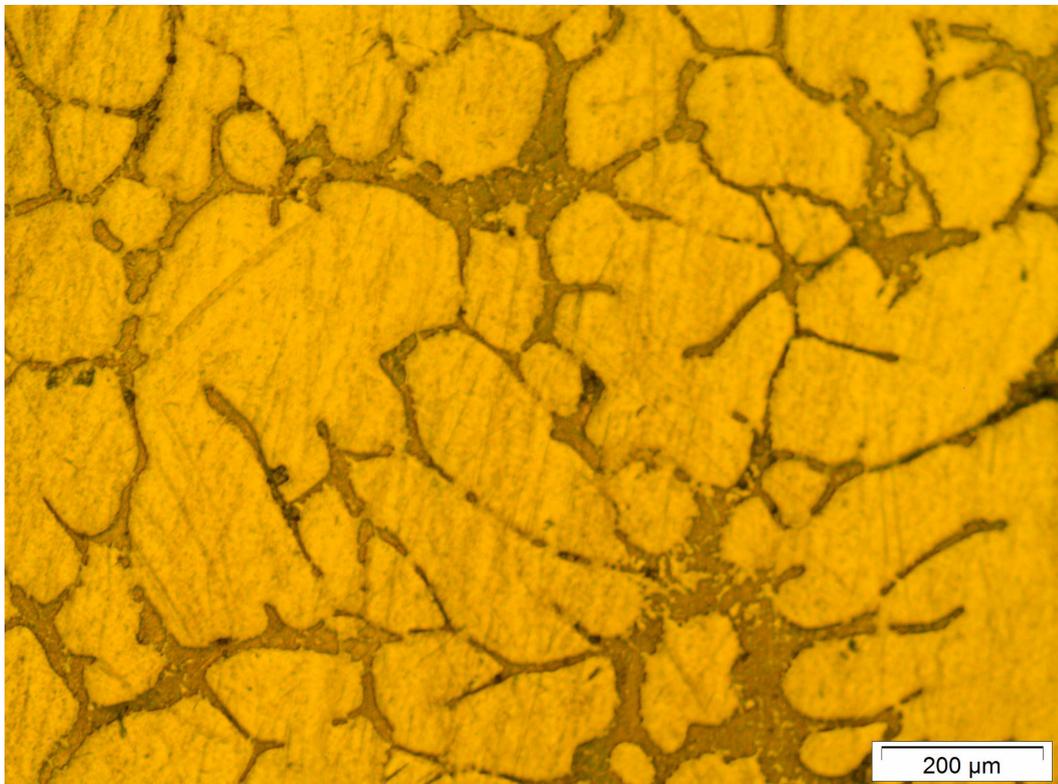


Figura 22 – Amostra 4 (375 °C) - superior

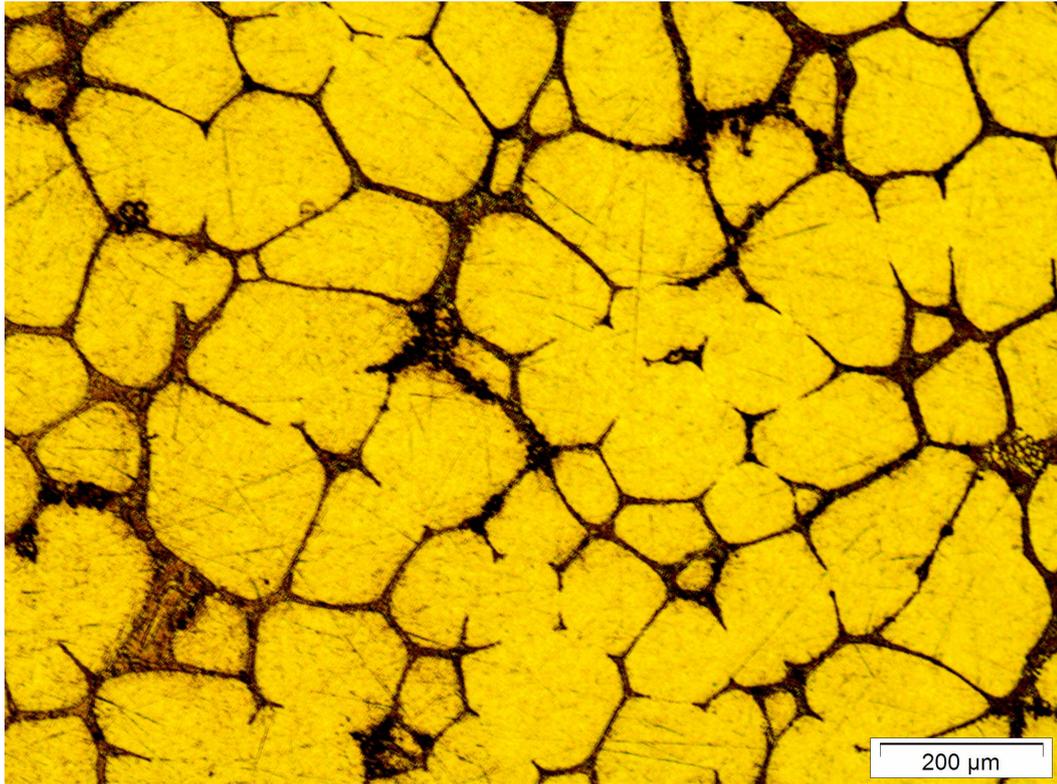


Figura 23 – Material original - superior

Com relação a microscopia da parte superior das amostras e do material original nota-se pouca diferença entre as imagens. No geral os grãos são bem definidos e equiaxiais, com a amostra 4 apresentando alguns grãos levemente alongados.

Na figura 20, imagem da parte superior da amostra 2, é possível ver alguns defeitos de superfície (regiões pretas). Como falado anteriormente, esses defeitos são originados do processo de fabricação, esse tarugo da liga ZK60 foi fundido utilizando um cadinho de seção retangular que apresentou trincas devido aos cantos vivos.

Observa-se nas imagens da seção transversal das amostras a presença de diversas linhas de escorregamento. Essas linhas são originadas da deformação plástica sofrida pelo material.

Comparando as imagens da seção transversal das amostras pode-se ver algumas diferenças mais expressivas entre elas. A imagem da amostra 1 mostra grãos extramamente deformados com baixos indícios de recristalização. Na amostra 2 já podemos enxergar grãos mais homogêneos, sendo possível verificar mais facilmente o início do surgimento de grãos recristalizados. Na amostra 4 conseguimos ver claramente a presença de grãos recristalizados, o que é coerente com a menor dureza encontrada. A forma como os grãos recristalizados aparecem está de acordo com a literatura, surgindo no contorno do grão original em tamanho menor.

5 CONCLUSÕES

Todas as amostras forjadas apresentaram o surgimento de trincas, mesmo o material original já possuindo defeitos de fabricação, essas trincas possivelmente se originaram devido a temperatura de forjamento ser acima de 315 °C (como visto na seção 4.1). As trincas se tornavam mais severas a medida que a temperatura do processo aumentava. A amostra 3, aquecida na temperatura limite (385 °C) indicada na literatura, entrou em combustão logo após ser retirada do forno, não podendo ser forjada.

A amostra 2, que sofreu maior deformação (0,191), obteve a maior estimativa de pressão de forjamento (50 - 67 MPa), enquanto que a amostra 4 (forjada na maior temperatura - 375 °C) obteve a menor (38 - 50 MPa). Esperava-se que a amostra 4 apresentasse a maior deformação, devido a maior temperatura do processo, porém isso não ocorreu. Problemas com o posicionamento da ferramenta durante o processo de forja podem ter causado perda de calor da amostra 4, reduzindo a capacidade de deformação.

A medida que a temperatura do processo aumentava, a dureza da amostra era reduzida. Os valores de durezas variaram de 58 a 68 na escala Vickers. Nenhuma das amostras superou o material original em questão de dureza, sendo a amostra 4 com menor dureza encontrada (58 HV) e com maiores indícios de recristalização.

REFERÊNCIAS

- [1] DA MATTA COSTA, A. C.; BEHRENS CORREIA, D. M. **Magnesita**, Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 471-479, 2008.
- [2] MORDIKE, B.; EBERT, T.; **Magnesium properties-applications-potential**. Materials Science and Engineering A. v. 302, p. 37-45, 2001.
- [3] KAINER, K. U., SRINIVASAN, P. B., BLAWERT, C., DIETZEL, W.; **Corrosion of Magnesium and its Alloys**. In: Cottis, B., Graham, M., Lindsay, R., Lyon, S., Richardson, T., Scantlebury, D., Stott, H. Shreir's Corrosion, 4^a ed. Amsterdam: Elsevier, p. 2011-2041, 2010.
- [4] MACHADO, M. V. T.; **Efeito da adição de terras raras na liga ZK60 fundida no estado semi-sólido por meio de tratamento térmico T6**. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del Rei. Departamaneto de Engenharia Mecânica. 2015.
- [5] ABBOTT, T.; EASTON, M.; SONG, W. **Mechanical behavior of cast magnesium alloys**. Materials Science - Forum Magnesium Alloys. v. 419, p.141-146, 2003.
- [6] U.S. GEOLOGICAL SURVEY, **Minerals Yearbook**, 2015.
- [7] ABM Associação Brasileira de Metalurgia; **11º Seminário de metais não ferrosos – SP – Setembro 2009**.
- [8] KLEINER, S.; UGGOWITZER, P. **Mechanical anisotropy of extruded Mg - 6%Al - 1%Zn alloy**. Materials Science and Engineering A. v. 379, p. 258 – 263, 2004.
- [9] <https://www.bucka.com.br/extintor-classe-d-fogo-em-metais-piroforicos/>. Acesso em: 15/09/2019.
- [10] BROOKS, C. R. **Heat treatment, Structure and Properties of Non-ferrous Alloy**, 1982.
- [11] ZHANG Z.; YU H.; WANG S.; WANG H.; MIN G. **Microstructure and Tensile Properties of ZK60 Alloy Fabricated by Simplified Rapid Solidification Powder Metallurgy (S-RS P/M) Process**. Journal of Materials Science and Technology, v. 26, n. 2, pp. 151–155, 2010.
- [12] CALLISTER, W. D. J. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. 4^a ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2014.
- [13] CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica Vol. 2**. 2^a ed. São Paulo. McGraw-Hill, 1986.
- [14] BRESCIANI FILHO, E. **Conformação plástica dos metais**. 6^a ed. São Paulo. EPUSP, 2011.
- [15] ASM METALS HANDBOOK, **Metalworking: Bulk Forming**. V. 14A, 10 Edition, 2005.

- [16] OLIVEIRA, F. A. G. de; **Avaliação da rugosidade e microdureza de superfície das ligas ZK60 com e sem adição de mischmetal e da liga AM60 após fresamento frontal** 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del Rei. Departamaneto de Engenharia Mecânica. 2016.
- [17] LIMA, D. R. S. de; **Desenvolvimento e controle de processos de conformação da liga de magnésio AZ61**. Tese de Doutorado. PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, de de 2019

Ivo Frederico dos Santos Nascimento
Matrícula: 201465068M – CPF: 111008167-71

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.