



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS - DE

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS SOARES SERAFIM

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA LIGA Cu-Al-Mn-Ti-B PASSÍVEL DO EFEITO MEMÓRIA DE
FORMA**

CARAÚBAS - RN

2019

LUCAS SOARES SERAFIM

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA LIGA Cu-Al-Mn-Ti-B PASSÍVEL DO EFEITO MEMÓRIA DE
FORMA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal Rural
do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dra. Aracelle de
Albuquerque Santos Guimarães.

CARAÚBAS - RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº

9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S481c Serafim, Lucas Soares.
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA Cu-Al-Mn-Ti-B
PASSÍVEL DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA / Lucas Soares
Serafim. - 2019.
38 f. : il.

Orientadora: Aracelle de Albuquerque Santos
Guimarães.
Coorientador: Andersson Guimarães Oliveira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. LMF. 2. Caracterização. 3. Cu-Al-Mn-Ti-B.
4. Microscopia. 5. Brinell. I. Guimarães,
Aracelle de Albuquerque Santos, orient. II.
Oliveira, Andersson Guimarães, co-orient. III.
Título.

LUCAS SOARES SERAFIM

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA LIGA Cu-Al-Mn-Ti-B PASSÍVEL DO EFEITO MEMÓRIA DE
FORMA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 19 / 03 / 2019 .

BANCA EXAMINADORA

Aracelle de Albuquerque Santos Guimarães

Aracelle de Albuquerque Santos Guimarães, Prof. Dr^a. (UFERSA)

Presidente

Andersson Guimarães Oliveira

Andersson Guimarães Oliveira, Prof. Me. (UFPB)

Membro Examinador

Rafael Bezerra Azevedo Mendes

Rafael Bezerra Azevedo Mendes, Prof. (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado paciência nos momentos estressantes e a força de continuar nos momentos de fraqueza em que pensei desistir desse curso;

Segundo, agradeço a minha mãe pelo apoio em toda minha trajetória, desde o meu nascimento até o dia de hoje, parabenizando meus acertos e criticando meus erros, sempre buscando que eu melhorasse, seja intelectualmente ou como pessoa, sendo assim a maior influencia e inspiração que eu tenho em minha vida;

Agradeço também aos meus avós, tias e tios, pelo suporte que me foi dado no decorrer do curso, por todo o apoio nos momentos em que precisei e que sei que ainda vou precisar;

Agradeço aos orientadores Carlos Cássio de Alcântara, Aracelle de Albuquerque Santos Guimarães e Andersson Guimarães Oliveira pelo tempo e conhecimento dedicados ao desenvolvimento do meu projeto, espero que a qualidade do mesmo faça valer a pena o esforço de todos;

Agradeço a Banca Examinadora por disponibilizar o seu tempo para avaliar o meu projeto, todos são muito atarefados, possuindo pouco tempo livre, por isso agradeço de coração pelo tempo que me cedem. Sei que o conhecimento de vocês irá enriquecer grandemente o meu trabalho.

Por fim, quero agradecer ao meu grande amigo Kairo Medeiros por toda ajuda na nossa longa caminhada desde que ingressamos na UFERSA, assim como a Enilson Costa, Jéssica Menezes, Lucas Martins, ao Técnico de Laboratório Samir e muitos outros que não irei citar, por toda a ajuda no desenvolvimento desse trabalho, saiba que sem vocês as coisas teriam sido bem mais difíceis.

Dedico este trabalho à minha mãe, meus avós e tios, que me apoiaram desde o início e são tão merecedores desse momento quanto eu.

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.

Albert Einstein

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo realizar a caracterização da liga de Cu-Al-Mn-Ti-B. A liga em questão foi elaborada utilizando métodos convencionais de fundição e o tarugo bruto de fusão foi usinado em quatro corpos de prova com dimensões obedecendo à norma ASTM E23-16b. Foram realizados tratamentos térmicos de homogeneização e têmpera respectivamente, em seguida foram realizados ensaios de dureza Brinell (de acordo com a norma ASTM E10-18), microscopia óptica e ensaio de impacto, respectivamente. Os objetivos proposto foram atingidos: obtiveram-se grãos refinados com tamanho de grão seis vezes menor que os grãos de ligas ternárias Cu-Al-Mn utilizando Ti e B como elementos de liga refinadores, aumento de 21,6% na dureza da liga em relação à liga ternária e baixa absorção de energia no ensaio de impacto, resultando em fraturas com características frágeis.

Palavras-chave: LMF. Caracterização. Cu-Al-Mn-Ti-B. Microscopia. Brinell.

ABSTRACT

This is paper aims to characterize the Cu-Al-Mn-Ti-B alloy by optical microscopy, Charpy impact test and Brinell Microhardness test. The alloy in question was made using conventional casting methods and the raw meltblown was machined into four specimens of dimensions conforming to ASTM E23-16b. Then, homogenization and quenching treatments were performed, respectively, for Brinell hardness tests (according to ASTM E10-18), optical microscopy and impact tests, respectively. All the programmed objectives were achieved: obtaining refined grains, with grain size six times smaller than the Cu-Al-Mn ternary alloy grains, using Ti and B as refining alloying elements, a 21.6% increase in the hardness of alloy in relation to the ternary alloy and low energy absorption in the impact test, resulting in fractures with fragile characteristics.

Keywords: SMA. Characterization. Cu-Al-Mn-Ti-B. Microscopy. Brinell.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito Memória de Forma.....	18
Figura 2 - Variação da superelasticidade em relação ao teor de alumínio.	19
Figura 3-Variação da superelasticidade em relação ao teor de Mn.	20
Figura 4 - a) Variação da trabalhabilidade a frio de ligas de acordo com a variação de elementos de liga; b) Variação da temperatura Ms de com a variação do teor de alguns elementos de liga.	21
Figura 5 - Dimensões do Corpo de prova para ensaio de impacto, entalhe-V e entalhe-U.....	23
Figura 6 - Processo de fundição tradicional - Cadinho de argila-grafite.....	28
Figura 7 - Corpos de prova usinados e homogeneizados.	29
Figura 8 - Falhas estruturais	29
Figura 9 - Corpos de prova rompidos apresentando característica de fratura frágil – vista de topo.	31
Figura 10-Corpos de prova rompidos apresentando característica de fratura frágil - vista lateral.	32
Figura 11-Liga Cu-Al-Mn-Ti-B – com ataque químico - 5x/50x.	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Composição da liga descrita em massa	22
Quadro 2-Dimensões do Corpo de prova para ensaio de impacto, entalhe-V e entalhe-U	23
Quadro 3-Graus de carga de alguns materiais.	26
Quadro 4-Cargas recomendadas para diversas esferas e graus de carga.	26
Quadro 5- Dureza média liga Cu-Al-Mn-Ti-B homogeneizada.....	30
Quadro 6- Valores de energia absorvida - Ensaio Charpy - CP 01, 02, 03 e 04.	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C – Grau Celsius

Af – Final da transformação austenítica

Al – Alumínio

As – Início da transformação austenítica

B – Boro

Be – Berílio

Cl – Cloro

CP – Corpo de prova

Cu – Cobre

EMF – Efeito Memória de Forma

Fe – Ferro

H – Hidrogênio

HB – Dureza Brinell

LMF – Ligas com Memória de Forma

Mf – Final da transformação martensítica

Mn – Manganês

Ms – Início da transformação martensítica

N – Nitrogênio

Ni – Níquel

O – Oxigênio

Ti – Titânio

Wt – Peso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo Geral.....	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
3.1. Ligas com memória de forma	16
3.1.1. Transformação martensítica	16
3.1.2. Superelasticidade	17
3.1.3. Efeito Memória de Forma (EMF).....	17
3.1.4. Efeito Memória de Forma de caminho único	18
3.1.5. Efeito Memória de Forma reversível.....	18
3.2. Efeito dos elementos de liga no binário Cu-Al.....	19
3.2.1. Efeito do Al nas ligas Cu-Al.....	19
3.2.2. Efeito do Mn nas ligas Cu-Al.....	19
3.2.3. Efeito do Ti nas ligas Cu-Al.....	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Elaboração das Ligas	22
4.2. Tratamentos Termomecânicos	22
4.2.1. Confecção dos corpos de prova (CP's)	22
4.2.2. Homogeneização	24
4.2.3. Têmpera	24
4.3. Caracterizações das ligas por Microscopia Óptica	24
4.4. Determinação das propriedades mecânicas através de Ensaio de Impacto Charpy e Microdureza Brinell.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1. Elaboração da liga.....	28
5.2. Caracterização da liga por ensaio de Microdureza Brinell	30

5.3. Caracterização da liga por Ensaio de Impacto Charpy	30
5.4. Caracterização da liga por Microscopia óptica	32
6. CONCLUSÃO	34
7. REFERÊNCIAS	35
ANEXO I.....	38

1. INTRODUÇÃO

As ligas com Efeito Memória de Forma (EMF) classificam-se como um grupo de materiais não-convencionais que possuem um universo de aplicações potenciais baseadas em suas propriedades termoelásticas.

Nos últimos anos, ligas à base de Ni-Ti e Cu-Al estão sendo profundamente estudadas por apresentarem resultados satisfatórios quanto às propriedades desejadas. As ligas de Ni-Ti são as que possuem melhores propriedades termoelásticas, tais como regeneração de forma e superelasticidade, que surgem a partir da transformação martensítica termoelástica, uma transformação sem difusão que resulta numa deformação homogênea da rede cristalina devido tensões internas de cisalhamento (PINA, 2006). Estas ligas estão sendo amplamente utilizadas em diversas áreas, tanto da engenharia como da medicina, devido sua biocompatibilidade. Em contrapartida, apresentam algumas desvantagens, como alto custo, dificuldade na produção, no processamento e baixas temperaturas de transformação (MALLIK; SAMPATH, 2008).

As ligas à base de Cu-Al possuem propriedades termoelásticas inferiores em relação às de Ni-Ti, mas estão ganhando espaço no mercado devido o melhor custo de elaboração e processamento, possuindo diversas aplicações em situações onde suas propriedades são compatíveis. Estudos recentes que visam à influência de aditivos à liga binária de Cu-Al, mostraram que ligas com baixo teor de alumínio ao adicionar manganês propicia melhorias na ductilidade e nas propriedades termomecânicas, como a redução da temperatura de início da transformação martensítica (M_s) (MALLIK; SAMPATH, 2008), proporcionando melhorias no Efeito Memória de Forma (EMF), visto que o mesmo diminui com o aumento o aumento de M_s (SUTOU; KAINUMA; ISHIDA, 1999).

O presente estudo visa gerar material literário sobre propriedades mecânicas e microestruturais da liga de memória de forma Cu-Al-Mn-Ti-B através de ensaios mecânicos e análises microscópicas. Tal atividade foi proposta devido às poucas informações disponíveis sobre o efeito do Titânio e Boro como elementos de liga e seus efeitos nas ligas com memória de forma.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar a caracterização da liga de Cu-Al-Mn-Ti-B no intuito de se obter propriedades que possam ser comparadas com as existentes na literatura.

2.2. Objetivos Específicos

- Elaborar a liga Cu-Al-Mn através de processo convencional de fundição, utilizando o Titânio e Boro como refinadores;
- Verificar a granulometria da liga para testar a eficiência do Ti e B como refinadores de grãos;
- Caracterizar a liga através de microscopia óptica, ensaio de dureza e ensaio de tenacidade à fratura (Charpy);
- Comparar os resultados com os existentes na literatura.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma (LMF) são classificadas na categoria dos materiais inteligentes. Essas ligas possuem a propriedade de sofrer mudanças microestruturais quando sujeitas a estímulos não mecânicos, como por exemplo, mudança de temperatura, chamado Efeito Memória de Forma; ou quando induzidas por tensão mecânica, chamado Efeito Superelástico sendo que, ambos os efeitos podem ser reversíveis, característica essa que as diferencia de outros materiais (LAGOUDAS, 2008).

Estas ligas possuem características únicas que têm encorajado estudos aprofundados sobre sua composição e microestrutura, incentivando a aplicação de LMF em diferentes áreas, como engenharia e medicina. Uma gama de ligas apresenta o efeito de memória de forma, mas o comércio busca somente aquelas que podem recuperar-se de uma grande quantidade de carga ou gerar uma expressiva restituição de força (NAVA, 2013). As ligas mais utilizadas em aplicações comerciais são baseadas em ligas Ni-Ti, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be e Cu-Al-Mn (CALUÊTE, 2012).

3.1.1. Transformação martensítica

Independente do método utilizado para retorno da liga ao estado inicial ser térmico ou cíclico, este efeito ocorre porque existem transformações de fase onde a estrutura martensítica se torna austenítica e depois do ciclo térmico ou de cargas ser encerrado, o mesmo volta a ser martensita. Esta característica é denominada transformação martensítica. A mesma permite a reversibilidade do processo de transformação através de movimento dos átomos sem que haja difusão, de forma que estado inicial e final do processo sejam correspondentes (LILLO, 2009).

Mesmo que não haja difusão dos átomos no processo de transformação de fase, ocorrem alterações em características físicas do metal caracterizando o processo, tais como relação de orientação cristalográfica entre as fases devido o movimento cooperativo, variações dimensionais e a composição química mantem-se constante independente da fase, tal fato só ocorre devido a não-difusão dos átomos (PINA, 2006).

Tratando da morfologia da estrutura martensítica, a mesma pode apresentar-se em formas de plaquetas ou agulhas, plaquetas lenticular, borboleta, formato V ou zigue-zague (GAMA, 2003).

3.1.2. Superelasticidade

A superelasticidade é a capacidade de um material metálico recuperar sua forma inicial após sofrer grandes deformações devido ciclos de carga-descarga (NAVA, 2013).

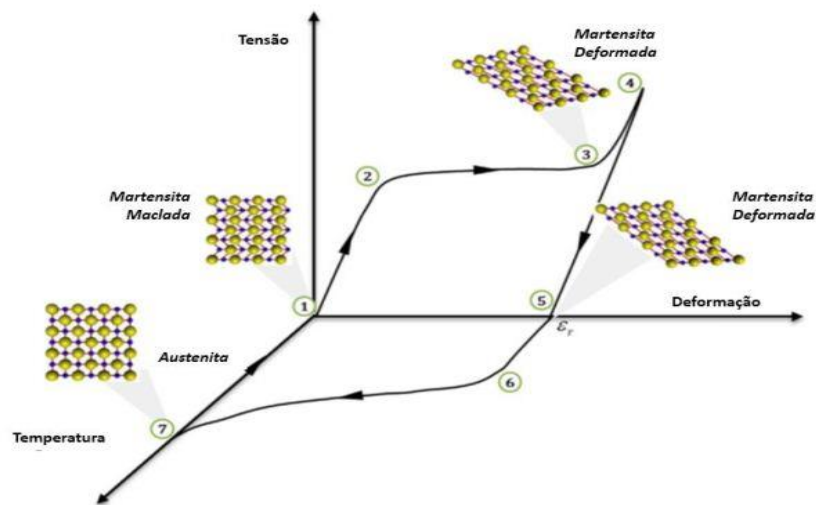
Quando se aplica cargas elevadas na fase austenítica, temperatura acima de A_f , é possível que ocorra transformação martensítica induzido pela tensão aplicada. A aplicação da carga faz com quem a austenita transforme-se em martensita deformada, onde a mesma retorna a fase austenítica assim que a carga é removida (LAGOUDAS, 2008).

A superelasticidade de ligas policristalinas à base de Cu sejam elas ligas de memória tais como Cu-Zn e Cu-Al, são diretamente dependentes do tamanho do grão. A capacidade de recuperação é melhorada quando há redução nas restrições de grãos, ou seja, quanto maior o tamanho de grão, melhor a capacidade de recuperar-se totalmente de grandes deformações causadas por ciclos de cargas (SUTOU *et al.*, 2013).

3.1.3. Efeito Memoria de Forma (EMF)

Inicialmente, o EMF assemelha-se a Superelasticidade, mas somente quando se trata de recuperação de grandes deformações que causam mudança de fase. Em LMF, o EMF ocorre quando existem de ciclos de carga-descarga, e quando aquecidos à temperatura acima de A_f recupera-se totalmente, retornando a fase austenítica (RAO *et al.*, 2015), assim como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Efeito Memória de Forma



Fonte: LAGOUDAS, 2008 (Adaptado).

3.1.4. Efeito Memória de Forma de caminho único

Considerando uma LMF com estrutura martensítica, a mesma pode ser facilmente deformada em baixas temperatura, abaixo de M_f , através da aplicação de cargas. Após a remoção da carga, surge uma deformação plástica remanescente, com a única limitação de não ultrapassar o limite de deformação de 8% (CALUÊTE, 2012), mas que pode ser revertida quando é aquecido acima da temperatura crítica. Este efeito é chamado de Efeito memória de forma de caminho único, pois somente a forma quente (inicial) foi memorizada (OLIVEIRA, 2009).

3.1.5. Efeito Memória de Forma reversível

Existem ligas com memória de forma que quando submetidos a tratamentos térmicos adequados consegue mudar de forma apenas com a carga térmica, sem a necessidade de agentes externos. Esse efeito é conhecido como Efeito memória de forma reversível e ocorre após submeter à liga a um processo cíclico fazendo com que a mesma associe uma forma para cada fase (CZECHOWICZ; LANGBEIN, 2015).

No EMF reversível, toda a microestrutura é alterada durante o processo de transformação martensítica formando variantes predominantes durante a transformação e isso faz com que a fase martensítica se encontre deformada somente pelo resfriamento da fase austenítica (CZECHOWICZ; LANGBEIN, 2015).

3.2. Efeito dos elementos de liga no binário Cu-Al

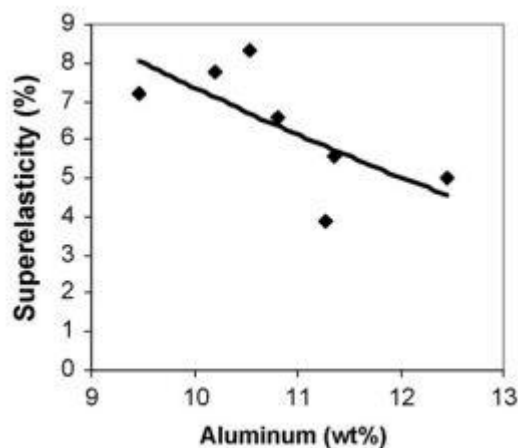
3.2.1. Efeito do Al nas ligas Cu-Al

O alumínio tem influência direta na ductilidade e na usinabilidade da liga. Pequenas quantidades de Al na composição melhoram a usinabilidade (ZAK *et al.*, 1996) e a ductilidade da liga devido a redução no grau de ordem da fase $L2_1$ (SUTOU *et al.*, 2006), entretanto, teores acima de 13% podem tornar a liga frágil (ZAK *et al.*, 1996).

Outra propriedade afetada pela variação de Al na composição é a temperatura de transformação martensítica da liga. Aumentando o teor de Al é possível obter diminuição da M_s em ligas Cu-Al-Mn (ZAK *et al.*, 1996).

A superelasticidade sofre influencia da variação de alumínio e manganês. Como mostra a Figura 2, ocorre a diminuição da superelasticidade com o aumento do teor de alumínio na composição da liga

Figura 2 - Variação da superelasticidade em relação ao teor de alumínio.



Fonte: U.S. Mallik, V. Sampath / Materials Science and Engineering A 481–482 (2008) 680–683

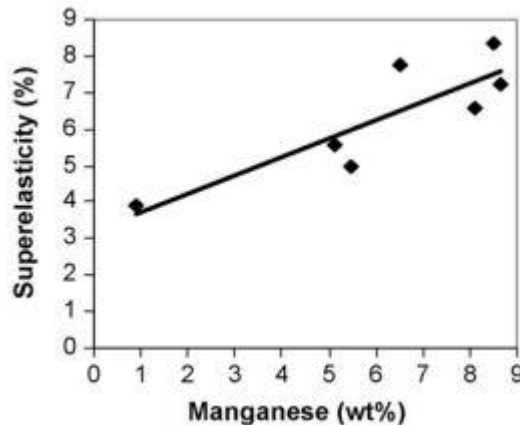
Por ultimo, o efeito memória de forma (EMF) também flutua de acordo com a variação do teor de Al. Quanto menor a concentração de Al, melhor a capacidade do EMF da liga (MALLIK; SAMPATH, 2008).

3.2.2. Efeito do Mn nas ligas Cu-Al

Como mencionado anteriormente, a variação do alumínio e manganês na composição, podem alterar a propriedade da superelasticidade da liga. Ao contrario do alumínio, quanto maior a concentração de manganês, melhor é a superelasticidade. Isso ocorre devido a

redução do grau de ordem da fase mãe L2₁. A Figura 3 mostra o percentual de variação da superelasticidade em relação a concentração de manganês na liga.

Figura 3-Variação da superelasticidade em relação ao teor de Mn.



Fonte: U.S. Mallik, V. Sampath / *Materials Science and Engineering A* 481–482 (2008) 680–683

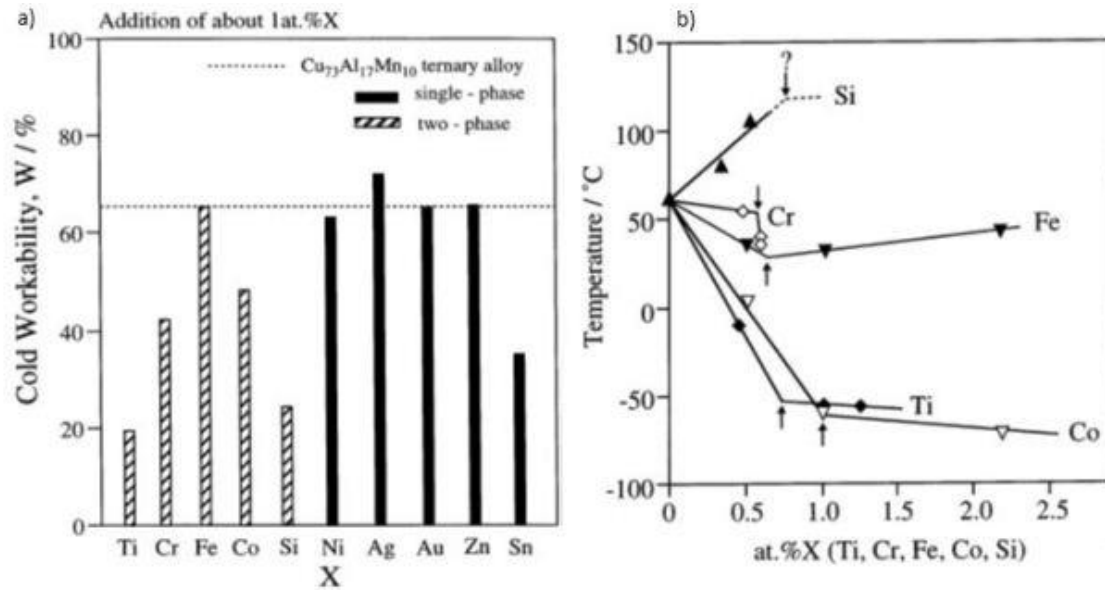
A redução no grau de ordem da estrutura L2₁ causada pelo aumento no teor de Mn é responsável por garantir ótima ductilidade às ligas Cu-Al-Mn, assim como melhora o EMF permitindo a recuperação de maiores deformações. O acréscimo de Mn nas ligas do sistema Cu-Al garante estabilidade a fase CCC, ou seja, garante estabilidade da fase austenítica em temperaturas mais baixas, expandindo a faixa de composições na qual esse fenômeno pode ocorrer (MALLIK; SAMPATH, 2008).

3.2.3. Efeito do Ti nas ligas Cu-Al

Segundo Mallik e Sampath (2009), o titânio age na liga ternária Cu-Al-Mn diminuindo as temperaturas de transformação martensítica (M_s), alterando a composição da matriz através da formação de precipitados, que surgem devido a baixa solubilidade do Ti.

Tais precipitados podem ocorrer em mais de uma fase, e quando surgem em uma segunda fase da matriz, causa o decaimento da capacidade de trabalho a frio da liga. Este mesmo problema pode surgir caso haja um aumento no grau de ordenamento da fase mãe (SUTOU; KAINUMA; ISHIDA, 1999). Em contra partida, segundo Alcântara (2017), a adição de Ti promove melhorias no EMF. Tais resultados estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 - a) Variação da trabalhabilidade a frio de ligas de acordo com a variação de elementos de liga; b) Variação da temperatura M_s de com a variação do teor de alguns elementos de liga.



Fonte: Sutou, Y.; Kainuma, R.; Ishida, K. (1999). (Modificada)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Elaboração das Ligas

Para este trabalho será utilizada uma liga policristalina de Cu-Al-Mn-Ti-B na respectiva composição: $\text{Cu}_{81,55}\text{Al}_{9,75}\text{Mn}_{8,1}\text{Ti}_{0,5}\text{B}_{0,1}$ (%wt.). O manganês encontra-se com uma camada de óxido em sua superfície na qual necessita ser removida, e para tal atividade será realizado um processo de decapagem utilizando uma solução de ácido nítrico 10% na composição H_2O -5% HNO_3 (% em volume). O manganês será imerso na solução por aproximadamente cinco minutos, sendo, após o tempo determinado, retirado o ataque químico através de dois processos de lavagem com banho em água corrente e em álcool etílico respectivamente, e por fim, será realizada a secagem do elemento com fluxo de ar quente para eliminar a umidade na superfície do material.

Determinada a composição e finalizada a preparação inicial dos elementos, os mesmos serão previamente pesados em uma balança analítica da marca Shimadzu, modelo TX323L e levados para o processo de fundição, utilizando um forno tipo mufla da marca LUCADAMA, modelo LUCA 2000, e um cadinho de argila-grafite, com uma quantidade de 1000g de material, sob atmosfera ambiente. O material fundido será vazado em um molde cerâmico de perfil quadrado com dimensões 30mm x 30mm x 150mm de profundidade.

4.2. Tratamentos Termomecânicos

Os tratamentos termomecânicos aplicados à liga foram homogeneização e têmpera.

4.2.1. Confecção dos corpos de prova (CP's)

Os corpos de prova (CP's) foram confeccionados obedecendo a composição descrita no Quadro 1 e a norma ASTM E23-16b que determina as dimensões de CP's para testes de impacto em materiais metálicos.

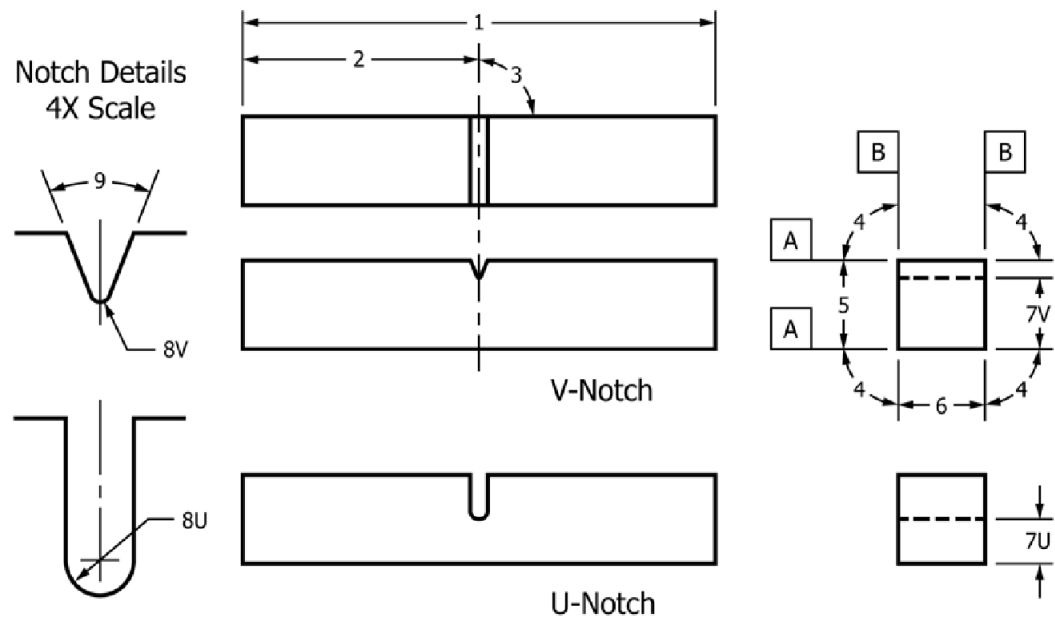
Quadro 1-Composição da liga descrita em massa

ELEMENTO	PESO (g)
Cobre	815,50
Alumínio	97,50

Manganês	81
Titânio	5
Boro	1

Fonte: Autor

Figura 5 - Dimensões do Corpo de prova para ensaio de impacto, entalhe-V e entalhe-U



Fonte: Norma ASTM E23-16b

Quadro 2-Dimensões do Corpo de prova para ensaio de impacto, entalhe-V e entalhe-U

ID	Descrição	Dimensão	Tolerância
1	Comprimento da amostra	55 mm	+0/-2.5 mm
2	Centralização do entalhe		±1 mm
3	Comprimento do entalhe à extremidade	90°	±2°
4	Ângulo dos lados adjacentes	90°	±0.17°
5	Largura	10 mm	±0.075 mm
6	Espessura	10 mm	±0.075 mm
7V	Comprimento do ligamento	8 mm	±0.025 mm
7U	Comprimento do ligamento	5 mm	±0.075 mm
8V	Raio de entalhe	0,25 mm	±0.025 mm
8U	Raio de entalhe	1 mm	±0.025 mm
9	Ângulo de entalhe	45°	±1°
A	Requisitos de acabamento da superfície	2 µm (Ra)	Menor ou igual

B	Requisitos de acabamento da superfície	2 μ m (Ra)	Menor ou igual
---	--	----------------	----------------

Fonte: Norma ASTM E23-16b

4.2.2. Homogeneização

Os corpos de prova usinados nas dimensões especificadas foram homogeneizados a 850°C por um período de 12 horas em um forno tipo mufla da marca LUCADEMA, modelo LUCA 2000.

4.2.3. Têmpera

Após o período programado para o processo de homogeneização, os corpos de prova aquecidos a 850°C recém-retirados do forno, foram resfriados em água à temperatura ambiente (aproximadamente 25°C).

4.3. Caracterizações das ligas por Microscopia Óptica

Finalizado os tratamentos térmicos dos CP's, é realizada a preparação dos mesmos para o ensaio metalográfico. Como os CP's serão utilizados para o ensaio de impacto, a etapa de embutimento da amostra é descartada. A preparação inicia-se pelo lixamento dos corpos de prova utilizando lixas d'água 80, 120, 320, 600, 1200 e por fim, o polimento utilizando alumina para um melhor acabamento superficial. Após o polimento, é realizado um ataque químico para melhor visualização dos grãos. Para esta etapa será utilizado uma solução de Cloreto de Ferro III (5g FeCl₃, 30ml de HCl 37% e 100ml de H₂O destilado), reativo para micrografia de superfície de grãos em ligas de Cobre (ROHDE, 2010) . As imagens da microestrutura são obtidas utilizando microscópio Olympus GX51.

4.4. Determinação das propriedades mecânicas através de Ensaio de Impacto Charpy e Microdureza Brinell.

A tenacidade à fratura das ligas será realizada mediante ensaio de impacto Charpy, segundo norma E23-16b da ASTM International.

Quanto à determinação da microdureza, a mesma obedece a norma ASTM E10-18, e segundo Garcia, Spim e Santos (2012), a Dureza Brinell pode ser mensurada pela razão da carga aplicada pela área da calota esférica do penetrador, como demonstrada na Equação 1:

$$dureza = \frac{P}{S} \quad (Equação 1)$$

Onde:

P – Carga de impressão [N]

S – Área da calota esférica [mm²]

Dureza – expresso em termos de pressão [MPa]

De acordo com a Equação 1, introduzindo a superfície da calota esférica na mesma, definimos a Dureza Brinell [HB] como mostra Equação 2:

$$HB = 0,102 \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - \underline{d}^2})} \quad (Equação 2)$$

Onde:

D – diâmetro do penetrador [mm]

$\underline{d}$ – diâmetro médio da impressão [mm]

P – Carga aplicada [N]

0,102 – fator de correção aplicado na conversão da carga para N, visto que inicialmente o ensaio não era realizado utilizando as unidades no SI. Ainda segundo Garcia, Spim e Santos (2012), o diâmetro médio de impressão ($\underline{d}$) pode ser calculado de acordo com a Equação 3:

$$\underline{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (Equação 3)$$

Mesmo a Dureza Brinell sendo uma função da carga sobre unidade de área, seu valor é expresso pelo valor do cálculo seguido do símbolo HB.

A carga a ser aplicada depende do material que será utilizado como corpo de prova no ensaio. Para definir a carga, utiliza-se o grau de carga, coeficiente tabelado de acordo com o tipo de material, e o diâmetro do penetrador. A Tabela 2 mostra os diferentes valores de grau de carga e as condições de aplicação dos mesmos, utilizando o valor selecionado na tabela da Tabela 3, que mostra as cargas para diferentes valores de grau de carga e diâmetro de penetrador.

Quadro 3-Graus de carga de alguns materiais.

Constante ou grau de carga	Materiais	Exemplos
30	Metais ferrosos e não ferrosos resistentes	Aços, ferros fundidos, níquel e ligas, cobalto e ligas, ligas de titânio
15	Somente para carga de 3000 kgf	Titânio e ligas, bem como materiais não tão duros e ligas leves (somente NBR NM-187-1)
10	Metais ferrosos dúcteis e maioria dos não ferrosos	Ferros fundidos, ligas de alumínio, ligas de cobre: latões, bronzes, ligas de magnésio, zinco
5	Metais não ferrosos moles	Metais puros alumínio, magnésio, cobre, zinco
2,5	Metais moles	Ligas de estanho, chumbo, antimônio, berílio, lítio
1,25	Metais mais moles	Metais puros berílio e lítio ou metais moles
1	Metais muito moles	Metais puros estanho, chumbo, antimônio

Fonte: Adaptado de Garcia, Spim e Santos, 2012.

Quadro 4-Cargas recomendadas para diversas esferas e graus de carga.

Constante ou grau de carga (ABNT e ASTM)							
Esfera D (mm)	30	15	10	5	2,5	1,25	1
Cargas (kgf)							
10	3000	1500	1000	500	250	125	100
5	750	-	250	125	62,5	31,25	25
2,5	187,5	-	62,5	31,25	15,625	7,812	6,25

2	120	-	40	20	10	5	4
1	30	-	10	5	2,5	1,25	1

Fonte: Adaptado de Garcia, Spim e Santos, 2012.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Elaboração da liga

A liga utilizada como objeto de estudo ($\text{Cu}_{81,55}\text{Al}_{9,75}\text{Mn}_{8,1}\text{Ti}_{0,5}\text{B}_{0,1}$) foi fabricada através do processo descrito no item 4.1 (Figura 6), com uma amostra de 1000g de material obedecendo à composição química pré-estabelecida, onde a mesma resultou em aproximadamente 900g de liga bruta fundida, visto que parte da amostra é perdida no processo de envase na matriz. A liga bruta foi submetida a um processo de usinagem, sendo dividido em quatro amostras com dimensões obedecendo à norma ASTM E23-16b para ensaio de impacto Charpy, e após, foram realizados os tratamentos térmicos de homogeneização e têmpera (Figura 7), descrito nos itens 4.2.2 e 4.2.3, para que sucessivamente fossem levados para os ensaios de microdureza Brinell e ensaio de impacto, na respectiva ordem.

Figura 6 - Processo de fundição tradicional - Cadinho de argila-grafite.



Fonte: Autoria Própria

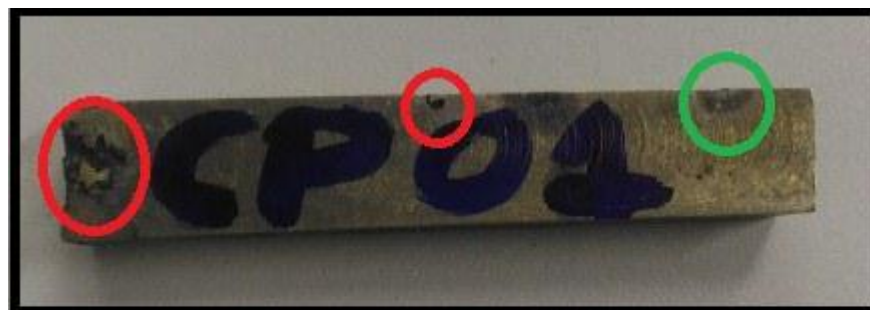
Figura 7 - Corpos de prova usinados e homogeneizados.



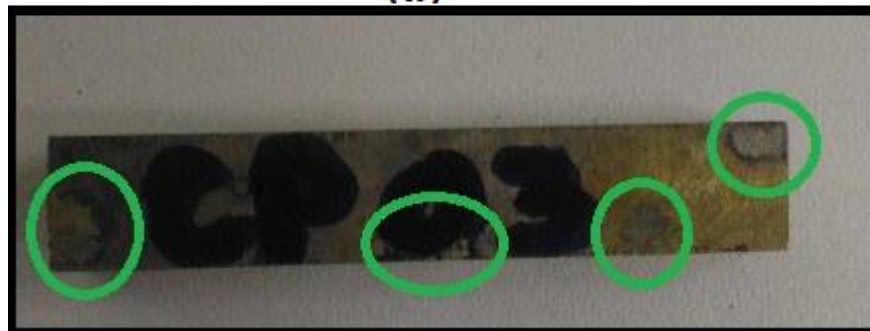
Fonte: Autoria Própria

Durante o processo de usinagem e após a homogeneização foram encontrados algumas falhas estruturais resultantes da fundição como não-preenchimento de algumas zonas e poros, destacados nas zonas em vermelho na Figura 7-a e concentração de elementos de liga (zonas verdes na Figura 8-a e 8-b) em algumas regiões, não sendo eliminado mesmo após o processo de homogeneização.

Figura 8 - Falhas estruturais



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria

5.2. Caracterização da liga por ensaio de Microdureza Brinell

O ensaio de microdureza Brinell foi realizado obedecendo à norma ASTM E10-18. Foram realizadas cinco medições em cada corpo de prova. A medição da calota esférica foi realizada com auxílio de um microscópio e um software de edição de imagens, os cálculos de diâmetro médio de impressão e dureza foram realizados utilizando as equações descritas no item 4.4. Os resultados das médias das cinco medições de cada corpo de prova, junto com o desvio padrão de cada média estão apresentados no Quadro 5 (Os valores de cada medição estão apresentados no Anexo I). De acordo com o material a ser ensaiado, foi determinado o grau de carga 30 (Quadro 3), com carga de 187,5 kgf e penetrador esférico com diâmetro de 2,5 mm (Quadro 4).

Quadro 5- Dureza média liga Cu-Al-Mn-Ti-B homogeneizada

CORPO DE PROVA	DUREZA MÉDIA [HB]	DESVIO PADRÃO
CP01	252,9	5,0
CP02	252,5	5,4
CP03	255,7	6
CP04	251,1	2,7

Fonte: Autor

Como há pouca variação nos valores de dureza das quatro amostras, conclui-se que a liga bruta de fusão era isotrópica. Portanto, um valor médio de dureza entre os quatro CP's será utilizado para futuras referências. Calculando a média das durezas, obtém-se um valor de 253,05HB.

Costa (2018) realizou estudos sobre a LMF de composição $\text{CuAl}_{9,75}\text{Mn}_{8,1}$ e através do ensaio de microdureza Brinell foi determinado que a liga, na composição especificada, possui dureza média de 208,1HB.

Conclui-se que a adição do Ti na liga base proporcionou um aumento de 21,6% na dureza da liga.

5.3. Caracterização da liga por Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto foi realizado obedecendo à norma ASTM E23-16b. Os corpos de prova foram fabricados nas dimensões especificadas na norma e descritas na Figura 1 e Tabela 1.

Como não foi possível realizar análises térmicas para determinar a energia perdida devido a temperatura, será expresso apenas o valor de energia total absorvida, obtido da leitura da máquina e apresentado na Tabela 8.

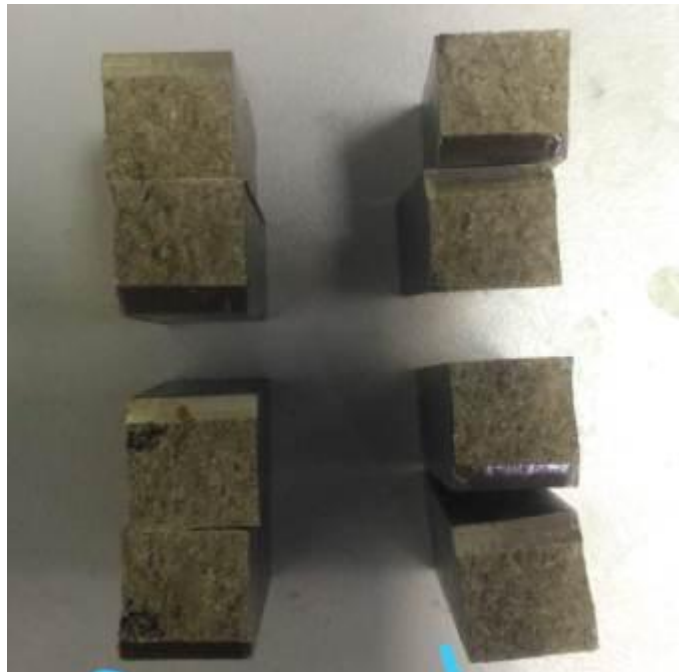
Quadro 6- Valores de energia absorvida - Ensaio Charpy - CP 01, 02, 03 e 04.

Ensaio de Impacto Charpy					Média	Desv.Pad
CP	1	2	3	4	-	-
Pré Carga [J]	300	300	300	300	-	-
Energia Absorvida [J]	5,5	7,5	8	7,5	7,125	1,10868

Fonte: Autoria própria.

Segundo Callister e Rethwhisch (2012), superfícies de fratura planas, sem qualquer indício de deformação plástica generalizada são características de fraturas frágeis, ocorrendo pela rápida propagação da trinca após uma deformação mínima, quase imperceptível. Tais características surgiram nos quatro corpos de prova ensaiados, indicando que a liga possui característica frágil, ou seja, alta dureza, o que implica em baixa tenacidade, justificando a baixa absorção de energia. Tais fraturas podem ser observadas nas Figuras 5 e 6.

Figura 9 - Corpos de prova rompidos apresentando característica de fratura frágil – vista de topo.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 10-Corpos de prova rompidos apresentando característica de fratura frágil - vista lateral.

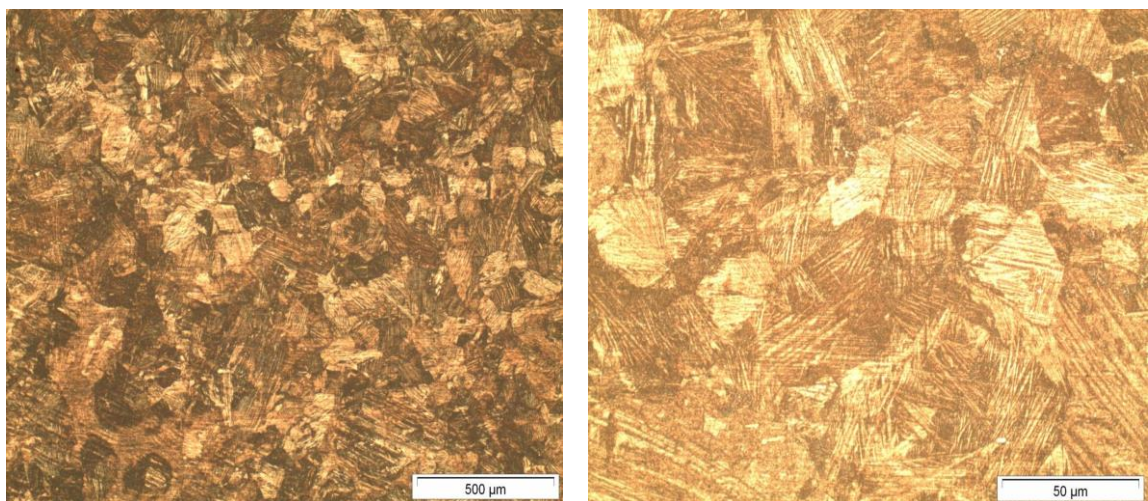


Fonte: Autoria Própria.

5.4. Caracterização da liga por Microscopia óptica

A figura 11 apresenta a liga Cu-Al-Mn-Ti-B sem e com ataque químico respectivamente. Devido os quatro corpos de prova apresentar valores aproximados de dureza e absorção de energia, concluiu-se que a liga era isotrópica no tarugo bruto de fusão, sendo assim, utilizado apenas um corpo de prova no ensaio metalográfico. O mesmo, em temperatura ambiente, apresenta estrutura martensítica, indicado pelas linhas em formato de agulhas nos grãos. A transformação martensítica ocorreu devido o rápido resfriamento no processo de têmpera, ativando também o Efeito Memória de Forma (EMF).

Figura 11-Liga Cu-Al-Mn-Ti-B – com ataque químico - 5x/50x.



Fonte: Autoria Própria.

O Ti foi utilizado para atuar como refinador de grão, formando uma liga com grãos menores que os de uma liga padrão Cu-Al-Mn. Para calcular o tamanho médio dos grãos foi utilizado o método de determinação do comprimento médio do intercepto, descrito na norma NBR NM241:2001, resultando em um tamanho médio de grão de 0,1933 mm.

Foram realizados ensaios metalográficos na liga $\text{CuAl}_{9,75}\text{Mn}_{8,1}$ produzida por Costa (2018), onde o mesmo utilizou do método acima citado para calcular o comprimento médio dos grãos, obtendo o valor de 1,17 mm.

Tal resultado aponta para eficácia no uso do Ti como elemento de liga, atuando como refinador de grãos, justificando também o aumento na dureza em relação a ligas comum compostas somente por Cu-Al-Mn. O tamanho do grão em metais policristalinos é um dos fatores que influenciam as propriedades mecânicas devido ligas com menor granulometria possuir maior área de contorno de grãos, impedindo a movimentação de discordâncias na rede cristalina, aumentando assim propriedades como dureza e resistência (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho tinha como objetivo a elaboração de uma liga passível do efeito memória de forma composta por Cu-Al-Mn-Ti-B com composição pré-determinada, para posteriormente realizar a caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas.

A liga ternária Cu-Al-Mn foi fabricada através do processo padrão de fundição, com a utilização do Ti e B como refinadores de grãos, obtendo grãos com tamanho seis vezes menor, aproximadamente, em relação à liga ternária sem refinadores. O comparativo foi realizado utilizando literatura existente.

A liga em estudo apresentou estrutura martensítica em temperatura ambiente após tratamentos térmicos. Através do ensaio de dureza Brinell, em relação a pesquisas recentes, foi possível comprovar o aumento de 21,6% na dureza da liga Cu-Al-Mn-Ti-B em relação à liga ternária Cu-Al-Mn, fato que é justificado pelo refino do grão. De acordo com Callister e Rethwisch (2012), o refino de grãos é um dos mecanismos de aumento de resistência, responsável pelo aprimoramento de propriedades mecânicas como dureza.

Outra característica de materiais com dureza elevada é que possuem baixa tenacidade, fato comprovado no ensaio de impacto Charpy, onde as quatro amostras submetidas ao teste absorveram uma média de 7,125J, apresentando sinais de fratura frágil.

7. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E10-18**: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken. 33 p., 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23-16B**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken. 26 p., 2016.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. NM241:2001 - **Determinação do tamanho de grão em materiais metálicos**. 2001.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica: José Roberto Moraes d'Almeida.

CALUÊTE, Rafael Evaristo. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS DA LIGA Cu78,3% - Al9,8% - Mn11,9%**. 2012. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

CZECHOWICZ, Alexander; LANGBEIN, Sven (Ed.). **Shape memory alloy valves: Basics, potentials, design**. Springer, 2015.

COSTA, Enilson de Sousa. **AVALIAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE LIGAS DO SISTEMA CuAlMn PASSIVEÍIS DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA SUBMETIDAS A TRATAMENTO DO CRESCIMENTO ANORMAL DE GRÃO**. 2018. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semiárido, Caraúbas, 2018.

GAMA, Jorge Luís Lauriano. **TRANSFORMAÇÃO DE FASE EM LIGAS DE COBRE COM MEMÓRIA DE FORMA**. 2003. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação

em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2003.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

LAGOUDAS, D.C. **Shape Memory Alloys: Modelling and Engineering Applications**. Ed. Springer, 2008.

LILLO, Rodrigo Andrés Araya. **MICROESTRUTURA Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA ALEACIÓN SUPERELÁSTICA Cu-11,8 %p.Al-0,5 %p.Be EN ENSAYOS DE TRACCIÓN MONOTÓNICOS Y CICLICOS**. 2009. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2009.

MALLIK, U.s.; SAMPATH, V.. Influence of quaternary alloying additions on transformation temperatures and shape memory properties of Cu–Al–Mn shape memory alloy. **Journal Of Alloys And Compounds**, v. 469, n. 1-2, p.156-163, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.01.128>.

MALLIK, U.s.; SAMPATH, V.. Effect of alloying on microstructure and shape memory characteristics of Cu–Al–Mn shape memory alloys. **Materials Science And Engineering: A**, v. 481-482, p.680-683, Maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.212>.

NAVA, Marcelo. **ESTUDO DAS CINÉTICAS DE RECRISTALIZAÇÃO E CRESCIMENTO DE GRÃOS DE LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA**. 2013. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Integridade de Materiais da Engenharia, Universidade de Brasília - Faculdade UnB Gama-faculdade de Tecnologia, Brasília, 2013.

OLIVEIRA, Dannel Ferreira de. **DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOMECAÑICAS DE LIGAS Cu-Al-Ni E Cu-Al-Be COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA PARA UTILIZAÇÃO COMO ATUADORES MECÂNICOS**. 2009. 48 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

PINA, Euclides Apolinário Cabral de. **ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO NA LIGA Cu-Al-Mn COM MEMÓRIA DE FORMA**. 2006. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2006.

RAO, Ashwin; SRINIVASA, Arun; REDDY, J. N. **Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. Springer, 2015. 130 p.

SUTOU, y; KAINUMA, R; ISHIDA, K. Effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile Cu–Al–Mn alloys. **Materials Science And Engineering: A**, v. 273-275, p.375-379, dez. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-5093\(99\)00301-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-5093(99)00301-9).

SUTOU, Y. et al. Grain size dependence of pseudoelasticity in polycrystalline Cu–Al–Mn-based shape memory sheets. **Acta Materialia**, v. 61, n. 10, p.3842-3850, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2013.03.022>.

SUTOU, Y. et al. Effects of grain size and texture on damping properties of Cu–Al–Mn-based shape memory alloys. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l., v. 438-440, p.743-746, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.085>.

ZAK, G.; KNEISSL, A.; ZATULSKIJ, G. **SHAPE MEMORY EFFECT IN CRYOGENIC Cu-Al-Mn ALLOYS**. Scripta Materialia, v. 34, n. 3, p. 363 – 367, 1996.

ANEXO I

Valores de Microdureza Brinell do CP01 Cu-Al-Mn-Ti-B Homogeneizado.

Testes	CP01	Diâmetro do penetrador [mm]	Carga [kgf]	d1	d2	Média	h	HB
1	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,914	0,978	0,95	0,09	256,8
2	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,95	0,985	0,97	0,10	245,1
3	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,935	0,964	0,95	0,09	254,9
4	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,935	0,957	0,95	0,09	256,8
5	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,964	0,95	0,96	0,10	250,7
Média HB	-	-	-	-	-	-		252,9
Desvio padrão	-	-	-	-	-	-		5,0

Fonte: Autoria própria.

Valores de Microdureza Brinell do CP02 Cu-Al-Mn-Ti-B Homogeneizado.

Medida	CP02	Diâmetro do penetrador [mm]	Carga	d1	d2	Média	h	HB
1	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,935	0,957	0,946	0,09	256,8
2	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,957	0,971	0,964	0,10	247,0
3	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,942	0,985	0,964	0,10	247,2
4	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,935	0,95	0,943	0,09	258,8
5	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,957	0,95	0,954	0,09	252,7
Média HB	-	-	-	-	-	-	-	252,5
Desvio padrão	-	-	-	-	-	-	-	5,4

Fonte: Autoria própria.

Valores de Microdureza Brinell do CP03 Cu-Al-Mn-Ti-B Homogeneizado.

Testes	CP03	Diâmetro do penetrador [mm]	Carga [kgf]	d1	d2	Média	h	HB
1	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,950	0,985	0,97	0,10	245,1
2	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,928	0,957	0,94	0,09	258,8
3	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,950	0,935	0,94	0,09	258,8
4	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,950	0,942	0,95	0,09	256,8
5	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,942	0,942	0,94	0,09	259,1
Média HB	-	-	-	-	-	-		255,7
Desvio padrão	-	-	-	-	-	-		6,0

Fonte: Autoria própria.

Valores de Microdureza Brinell do CP04 Cu-Al-Mn-Ti-B Homogeneizado

Testes	CP04	Diâmetro do penetrador [mm]	Carga [kgf]	d1	d2	Média	h	HB
1	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,935	0,971	0,95	0,09	252,9
2	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,957	0,971	0,96	0,10	247,0
3	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,935	0,978	0,96	0,10	251,0
4	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,957	0,957	0,96	0,10	250,7
5	Cu-Al-Mn-Ti-B	2,5	187,5	0,95	0,952	0,95	0,09	254,0
Média HB	-	-	-	-	-	-		251,1
Desvio padrão	-	-	-	-	-	-		2,7

Fonte: Autoria própria.