



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA SUPERELASTICIDADE DE UMA LIGA

Cu 81,85% - Al 8,15% - Mn 9,5% A PARTIR DA ADIÇÃO DO Fe 0,5%

Por

Reinaldo Alves Pequeno Junior

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do título de Graduado em Engenharia Mecânica

REINALDO ALVES PEQUENO JUNIOR

ESTUDO DA SUPERELASTICIDADE DE UMA LIGA

Cu 81,85% - Al 8,15% - Mn 9,5% A PARTIR DA ADIÇÃO DO Fe 0,5%

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do título de
Graduado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Evaristo Caluête

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

J95e Junior, Reinaldo Alves Pequeno.
Estudo da superelasticidade de uma liga Cu 81,85% - Al
8,15% - Mn 9,5% a partir da adição do Fe 0,5% /
Reinaldo Alves Pequeno Junior. - João Pessoa, 2019.
34 f.

Orientação: Rafael Evaristo Caluête.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Efeito memória de forma, Superelasticidade. I.
Caluête, Rafael Evaristo. II. Título.

UFPB/BC

**ESTUDO DA SUPERELASTICIDADE DE UMA LIGA
Cu 81,85% - Al 8,15% - Mn 9,5% A PARTIR DA ADIÇÃO DO Fe 0,5%**

Por

Reinaldo Alves Pequeno Junior

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em 10 de Maio de 2019

Prof. Dr. RAFAEL EVARISTO CALUÊTE
Orientador – UFPB

Prof. Dr. SIDERLEY FERNANDES
ALBUQUERQUE
Examinador - UFPB

Me. CARLOS CÁSSIO DE ALCÂNTARA
Examinador - UFPB

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares por me apoiarem durante todo o período do curso, e que tiveram à paciência de esperar este dia chegar.

A minha namorada Anny Kerollayny por estar comigo nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Aos meus amigos de convívio e de moradia, em especial Felipe e Tainara, por terem me ensinado a curtir a vida.

Ao meu orientador Rafael Evaristo Caluête, que esteve sempre presente durante minha pesquisa, e sempre disponível nos momentos de dúvidas.

RESUMO

As ligas com efeito memória de forma vem sendo estudadas com mais afinco nos últimos anos. Sua característica de deformar e voltar ao seu estado anterior é de grande valia para o setor industrial, da saúde, aeronáutico, entre outros. Neste trabalho foi, foi elaborado uma liga Cu 81,85% - Al 8,15% - Mn 9,5% - Fe 0,5% (% em peso). Foi produzido corpos de provas para serem utilizados em ensaios de tração e superelasticidade. Também foi feito capturas de imagens através da microscopia óptica para assim analisar como a adição de ferro na liga foi benéfica para o refino do grão. Todos os ensaios foram comparados com resultados do estudo feito por CALUÊTE em 2012.

Palavras-Chave: Liga com efeito memória de forma, Superelasticidade Ensaio de Tração, Refinadores, Microscopía.

ABSTRACT

Alloys with shape memory effect have been studied with greater finesse in recent years. Its characteristic of deforming and returning to its previous state is of great value for the industrial, health, aeronautical sector, among others. In this work, a Cu 81.85% - Al 8.15% - Mn 9.5% - Fe 0.5% (wt%) alloy was prepared. Test bodies were produced to be used in tensile and superelastic tests. Also it was made captures of images through the optical microscopy so to analyze how the addition of iron in the alloy was beneficial for the refining of the grain. All trials were compared with results of the study by CALUËTE in 2012.

Keywords: Alloy with shape memory effect, Superelasticity Traction Test, Refiners, Microscopy.

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	X
APRESENTAÇÃO.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivos Gerais	2
1.1.2. Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO II	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Ligas com efeito memória de forma	3
2.2. Efeito memória de forma de único caminho	4
2.3. Superelasticidade	5
2.4. Tratamento Térmico	6
2.5. Têmpera	7
2.6. Homogeneização	7
2.7. Fundição em moldes permanentes por gravidade	8
2.8. Nucleação heterogênea	8
2.9. Refinadores de grão	9
CAPÍTULO III	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1. Elaboração da Liga.....	10
3.2. Elaboração dos corpos de prova	12
3.3. Tratamento térmico	12

3.4 Caracterização microestrutural por microscopia óptica	13
3.5. Superelasticidade	14
CAPÍTULO IV	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	15
4.1. Caracterização da liga por Microscopia Óptica	15
4.2. Ensaio de tração	17
4.3. Ensaio de Superelasticidade.....	19
CAPÍTULO V	21
5. CONCLUSÃO	21
CAPÍTULO VI	22
6. BIBLIOGRAFIA	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema mostrando a deformação na fase martensítica após aplicação de carga.....	4
Figura 2 - Esquema mostrando o efeito de memória de forma no descarregamento e posterior aquecimento.....	5
Figura 3 – Curva Tensão-Deformação superelástica esquemática.....	6
Figura 4 – Cadinho de grafite.....	10
Figura 5 – Forno de indução.....	11
Figura 6 - Molde de seção.	11
Figura 7 - Desenho com dimensões do corpo de prova.....	12
Figura 8 - Forno tipo mufla.	13
Figura 9 - Microscopia da Liga Cu-81,85% - Al-8,15% - Mn-9,5% - Fe-0,5% (% em peso).	16
Figura 10 - Fase austenita na liga Cu 78,3% - Al 9,8% - Mn 11,9%.	16
Figura 11 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova 1.	18
Figura 12 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova 2.	18
Figura 13 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova 3.	19
Figura 14 - Comparação dos ensaios de superelasticidade	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Inoculante para refino de grão e respectivas eficiências (BALDAM, 2014) ..	9
Tabela 2 – Propriedades das ligas com refinador.	17
Tabela 3 – Propriedades médias das ligas com e sem refinador.	17

LISTA DE SIMBOLOS

% – Porcentagem;

°C – Grau Celsius;

Al – Alumínio;

Cu – Cobre

Mn – Manganês

Fe – Ferro

d – tamanho do grão;

EMF – Efeito Memória de Forma;

h – Tempo em hora;

K – Kelvin;

min – Tempo em minuto;

M_S - Temperatura de início de transformação direta ou martensítica;

A_S - Temperatura de início da transformação reversa ou austenítica;

M_F : Temperatura em que se tem o final da transformação direta ou martensítica;

A_F - Temperatura final da transformação reversa ou austenítica;

SMA – Shape Memory Alloy (liga com memória de forma, em inglês);

t – Tempo;

T - Temperatura;

β – Fase cristalina;

β' – Fase cristalina;

γ' – Tipo de martensita;

γ_2 – Fase;

$\Delta\sigma$ – tensão de histerese;

ε – Deformação;

σ – Tensão;

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

As ligas de memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA) estão sendo amplamente usadas no nosso cotidiano. Tanto na área industrial como na saúde, aeronáutica, entre outras. Alguma de suas aplicações são: controle vibracional em estruturas, arcos odontológicas, aplicações em tubulações e aplicações na aeronáutica. Com a popularização deste tipo de liga, tem-se estudado cada vez mais formas de melhorar suas propriedades termomecânicas.

A liga passível de memória de forma mais popular é a Ni-Ti, também conhecida como Nitinol, que tem um custo mais elevado que as demais. O efeito também pode ser conseguido em ligas criadas a partir de zinco, cobre, ouro e ferro, sendo as de ferro e cobre comercialmente mais baratas que as demais. Dado o baixo custo, as ligas de Cu-Al estão cada vez mais sendo exploradas para que se consigam adequá-las ao mercado consumidor que necessita deste efeito. Tais ligas tem boa recuperação de forma, superior a 4% e ductilidade superior a 12%, (VELOSO, 2002, GOMES et al. 2008), unido a um baixo custo de processamento, porém seu uso é limitado a temperaturas elevadas. Para adequar-se a esta finalidade é necessário que as transformações de fase ocorram em baixas temperaturas, início da transformação martensita inferior a zero ($M_s < 0^\circ\text{C}$).

Ligas Cu-Al-Mn, quando modificadas por um quarto elemento ou por meio de tratamentos térmicos adequados podem apresentar as características desejadas como: baixas temperaturas de transformação, boa recuperação de forma e boas propriedades mecânicas (OLIVEIRA, 2009).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos Gerais

Estudo da influência da adição de Fe, como refinador de grão, nas propriedades termomecânicas de uma liga com efeito de memória de forma Cu-Al-Mn.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinação das propriedades termomecânicas da liga Cu-Al-Mn-Fe por meio de ensaios de tração, e superelasticidade;
- Caracterização da liga Cu-Al-Mn-Fe, por microscopia óptica;
- Comparação dos resultados deste experimento com o trabalho feito por CALUÊTE, 2012.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ligas com efeito memória de forma

Ligas com memória de forma são materiais que tem a capacidade de recuperar sua forma “original”, sem haver a deformação permanente, após sofrer o aquecimento da liga. Algumas de suas propriedades são a superelasticidade, efeito memória de forma, recuperação de forma após sofrer tensões elevadas e alta capacidade de amortecimento (SCHWARTZ, 2009).

O efeito memória de forma e a superelasticidade ocorrem devido a mudanças de fase sólida ou cristalina, por meio de rearranjo atômico. A origem destes dois fenômenos físicos está associada às transformações martensíticas termoelásticas.

Estas ligas possuem duas fases sólidas, a *Martensita* (fase que acontece à baixa temperatura) e *Austenita* (fase que ocorre à alta temperatura). As características desses materiais estão ligadas com as transformações que ocorrem entre estas duas fases sólidas. As temperaturas de transformação ocorrem entre -150°C e 200°C , dependendo da composição e da constituição microestrutural (SCHWARTZ, 2009).

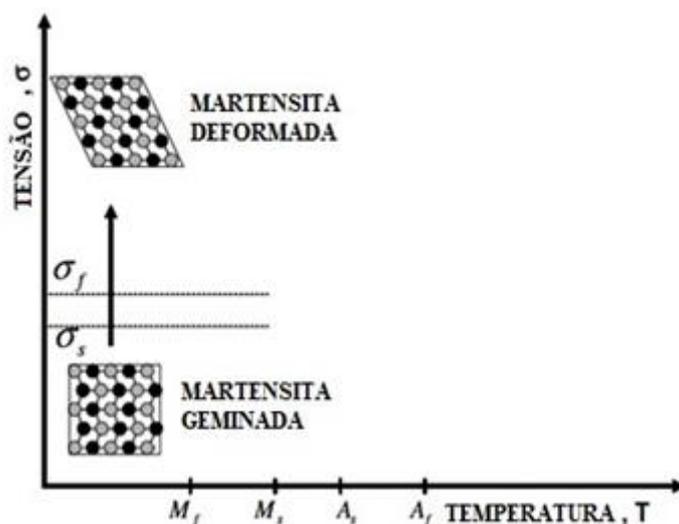
A martensita possui estrutura que pode ser tetragonal, ortorrômbica ou monoclínica. Já a austenita geralmente possui a estrutura cúbica. Com o resfriamento, na ausência de uma carga aplicada, a estrutura cristalina muda de austenita para martensita. Essa transformação é denominada *transformação martensítica* ou *transformação direta*. Quando o material é aquecido durante a fase martensítica, a estrutura cristalina volta a ser austenita, onde não está associada mudanças de forma. Essa transformação é denominada *transformação reversa* (LAGOUDAS, 2008).

2.2. Efeito memória de forma de único caminho

Ligas com efeito memória de forma, em sua maioria, são feitas para memorizar a forma em baixas temperaturas, onde o material é martensítico. Este efeito é chamado de *Efeito de memória de forma de caminho único*. Também se tem os efeitos de memória de forma de dois caminhos, porém, este não é o foco deste trabalho.

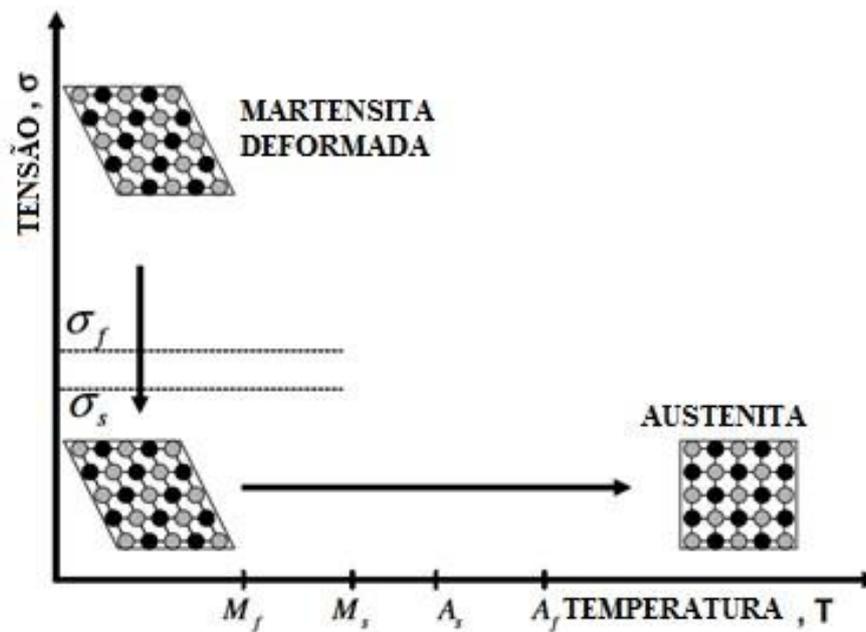
Quando o material está a baixa temperatura, ao se aplicar uma carga resultará em uma possível deformação da martensita pela orientação de algumas variantes (*Figura 1*), obedecendo a restrição de que a deformação não ultrapasse, geralmente, 8%. O resultado é uma deformação de ordem macroscópica, permanecendo com a configuração resultante, mesmo depois de retirada a carga. Quando for realizado um aquecimento nessa liga com uma temperatura acima de A_f (*temperatura austenítica final*), toda a fase sólida que era martensítica, agora transforma-se em austenita, recuperando sua forma original (*Figura 2*).

Figura 1 - Esquema mostrando a deformação na fase martensítica após aplicação de carga.



Fonte: LAGOUDAS, 2008 – Modificado.

Figura 2 - Esquema mostrando o efeito de memória de forma no descarregamento e posterior aquecimento.



Fonte: LAGOUDAS, 2008 – Modificado.

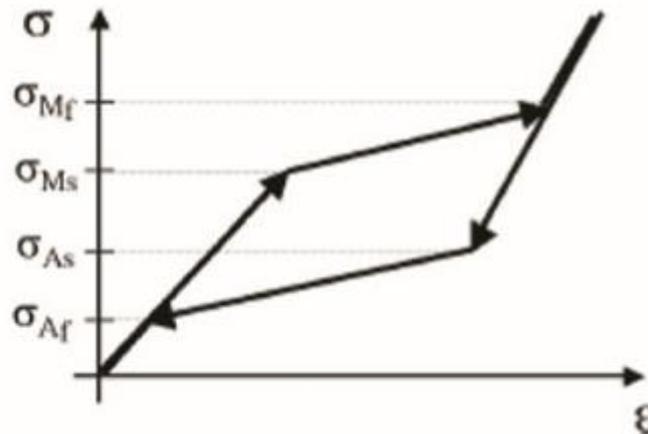
2.3. Superelasticidade

A superelasticidade é caracterizada por uma recuperação da deformação após retirada a carga, em temperaturas acima de A_f (fase austenítica). Essa deformação é devido a transformações martensíticas induzidas por tensão e por orientação da estrutura cristalina (KRISHNAN et al., 1974). Em configurações livres de tensões, apenas a austenita é termodinamicamente estável acima de A_f , logo a martensita formada é instável (DELAY et al., 1974). Esta característica depende muito em relação às temperaturas características de transformação.

Ao submeter o material a uma tração mecânica, observa-se um comportamento elástico até um determinado nível de tensão (Figura 3). A partir daí observa-se uma deformação relativamente grande com pequena variação da tensão. Ao retirar a carga da liga, retorna ao seu estado inicial, percorrendo uma histerese. A área delimitada pela

histerese expressa a energia absorvida durante o processo. A deformação produzida pela aplicação de tensão é recuperada com o descarregamento (KRISHNAN et al., 1974).

Figura 3 – Curva Tensão-Deformação superelástica esquemática.



Fonte: KRISHNAN et al, 1974 – Modificado.

2.4. Tratamento Térmico

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinada (CHIAVERINI – 1982).

Quase todos os aços de alto carbono ou com elementos de liga são obrigatoriamente submetidos a tratamentos térmicos antes de serem colocados em serviço. Dentre os principais objetivos dos tratamentos térmicos, podemos listar resumidamente a redução de tensões internas (oriundas de esfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa), aumento da resistência mecânica e a melhora da ductilidade.

2.5. Têmpera

Têmpera é um processo de tratamento térmico de aços para aumentar a sua dureza e resistência. A têmpera tem duas etapas: aquecimento e esfriamento rápido. O aquecimento tem como objetivo obter a organização dos cristais do metal, numa fase chamada austenitização. O esfriamento brusco visa obter a estrutura martensita.

Na têmpera o aquecimento é superior à temperatura crítica, que é de 727°C. O objetivo é conduzir o aço a uma fase, na qual se obtém o melhor arranjo possível dos cristais do aço, para obter a futura dureza. A têmpera é obtida em temperaturas diferentes, o que depende da composição do aço da peça e dos seus objetivos. Cada aço tem uma temperatura de austenização, e que é aquela que proporciona o máximo de dureza. Essa temperatura é obtida dentro de fornos, os quais podem ser por chama ou por indução elétrica.

A segunda etapa da têmpera é o resfriamento, o qual deve ser brusco, em óleo ou água. A rapidez do resfriamento é importante para impedir que o aço mude para fase diferente daquela que se obteve na temperatura de austenização (obter estrutura martensítica).

Nas ligas passíveis do efeito de memória de forma, a têmpera é utilizada para ativar suas propriedades especiais.

2.6. Homogeneização

Na fundição, as diversas regiões do lingote há o resfriamento sob diferentes taxas, e conseqüentemente, a solidificação em taxa de velocidades diferentes, levando a formação de uma estrutura irregular e não-uniforme. O tratamento de homogeneização promove a dissolução de fases com mais baixas temperaturas de fusão, reduzindo a fração de volume de segunda fase, tornando a composição química do material mais uniforme e melhorando as propriedades e desempenho da liga (PENG, 2014). O tratamento térmico de homogeneização consiste em um aquecimento do material em

um determinado período de tempo e temperatura, até que esse material se encontre em equilíbrio de fases.

2.7. Fundição em moldes permanentes por gravidade

A fundição é o processo de colocar metal líquido em um molde, e depois permitir que esfrie e solidifique. Os principais processos de fundição são moldagem em areia, moldagem permanente por gravidade, sob pressão, centrífuga e alta precisão. A escolha do processo adequado depende do tamanho e da geometria da peça, do tipo de liga a ser fundida, do número de peças, e da qualidade superficial desejada, entre outros.

Siegel (1982) define o processo de fundição de molde permanente como qualquer processo de fundição em que o metal líquido é inserido em um molde metálico que pode ser utilizado inúmeras vezes, sendo assim denominado permanente.

Uma das aplicações mais importantes de moldes permanentes é na produção de lingotes. Esses moldes apresentam vantagens, pois as peças têm maior uniformidade, melhor acabamento superficial, tolerâncias dimensionais mais estreitas e melhores propriedades mecânicas (BALDAM, 2013).

2.8. Nucleação heterogênea

Entende-se nucleação como o surgimento da fase sólida de maneira estável dentro da fase líquida, na forma de pequenos núcleos, que vão crescer e formar cristais.

Quando a nucleação ocorre dentro da fase líquida sem haver interferência ou contribuição energética de elementos estranhos ao sistema original, definimos essa situação como *nucleação homogênea*. Já a nucleação heterogênea, caracteriza-se pela influência de elementos estranhos ao sistema, chamados de substratos, cuja tensão superficial participa do balanço energético da sobrevivência do embrião sob forma de núcleo sólido. Nessas condições, o embrião surge na superfície do substrato na forma de

uma calota esférica, beneficiando-se da energia de superfície presente (BALDAM, 2013).

2.9. Refinadores de grão

Quando se fala em desempenho mecânico, é importante que uma liga possua o tamanho de grão pequeno, e assim a resistência mecânica do material é aumentada substancialmente, mantendo o alongamento. Quando se deseja maior resistência mecânica, mantendo o alongamento, é comum buscar o processo de *refino de grão*, que aumenta a frequência de nucleação e, conseqüentemente, minimiza o tamanho médio dos cristais sólidos. Um dos processos de refino é a adição ao metal líquido de substratos heterogêneos com alto poder de nucleação na forma de partículas finamente divididas antes da solidificação (BALDAM, 2013).

Essas adições são chamadas de inoculantes. Os inoculantes mais comuns em ligas de cobre são o Ferro, o Nióbio e o Vanádio, sendo que o Ferro tem uma eficiência relativa maior de que os outros.

Tabela 1 - Inoculante para refino de grão e respectivas eficiências (BALDAM, 2014)

Metal e liga	Inoculantes	Eficiência relativa
Ligas de cobre	Ferro	Moderada
	Nióbio	Baixa
	Vanádio	Baixa

O refino do grão também pode ser obtido com altas taxas de resfriamento da liga (quanto mais alta a taxa de resfriamento, mais refinada é a microestrutura).

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Elaboração da Liga

As ligas elaboradas foram feitas a partir de uma liga mãe Al 70% - Fe 30% (% em peso). Todos os materiais utilizados eram comercialmente puros. Para medição dos elementos foi utilizado uma balança de modelo AY220 da Shimadzu. A composição da liga foi: Cu 81,85% - Al 8,15% - Mn 9,5% - Fe 0,5% (% em peso);

Aproximadamente 350g da liga foi elaborada em um cadinho de cerâmica com parte interna de grafite (*Figura 4*), em um forno de indução da INDUTHERM, modelo UM 400 (*Figura 5*), em temperatura de aproximadamente 1300°C. Após este processo, a liga foi vazada em um molde de seção retangular (*Figura 6*) com dimensões de 90 mm de comprimento, 22 mm de largura e 40 mm de altura.

Figura 4 – Cadinho de grafite.



Fonte: Autor.

Figura 5 – Forno de indução.



Fonte: Autor.

Figura 6 - Molde de seção.

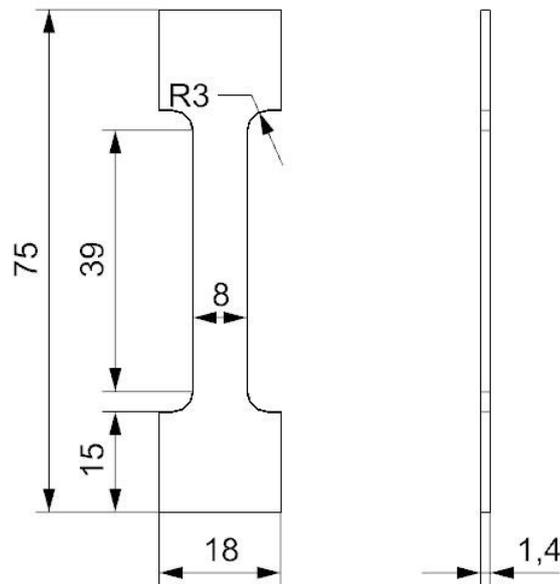


Fonte: Autor.

3.2. Elaboração dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios mecânicos, corpos de prova foram confeccionados na oficina mecânica/CT/UFPB, por meio da máquina de eletroerosão modelo ELETROCUT AR 1300. As dimensões, em milímetros, dos corpos de prova estão ilustradas na *Figura 7*. Cerca de 10 corpos de prova foram obtidos de cada liga. As medidas tem como base a norma ABNT NBR 6152/92 (MB-4).

Figura 7 - Desenho com dimensões do corpo de prova.



Fonte: Autor.

3.3. Tratamento térmico

Para a obtenção do efeito memória de forma, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera, com o aquecimento da liga a uma temperatura de 850°C, mantido por 30 minutos em um forno tipo Mufla (*Figura 8*), e logo após foi rapidamente resfriado em água a temperatura ambiente.

Figura 8 - Forno tipo mufla.



Fonte: Autor.

3.4 Caracterização microestrutural por microscopia óptica

A fim de se determinar a microestrutura obtida pelo processo de fundição, a liga foi caracterizada por microscopia óptica. A amostra, retirada da região central do lingote, foi primeiramente lixada em lixas de granulometria 180, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200, respectivamente, e depois polidas em uma politriz rotatória por meio da utilização de alumina 1 μm . Feito isto, o corpo de prova foi submetido a ataque químico com cloreto de ferro, de modo a revelar os contornos de grão e, conseqüentemente, a estrutura granular presente. Por meio de um microscópio óptico modelo AXIOTECH 30, foram tiradas fotos da microestrutura e feita a análise do tamanho médio de grão pelo método de interceptos de Heyn.

3.5. Superelasticidade

Para a realização do ensaio de superelasticidade, corpos de prova com dimensões semelhantes ao da Figura 7 foram utilizados. O ensaio consistiu-se de carregar as amostras até uma deformação de 5% e 7% e descarregá-los a fim de verificar sua recuperação de deformação e, também, sua deformação residual. Foi verificado as tensões e deformações nas quais ocorreram o início e fim das transformações direta e reversa. O ensaio foi realizado em uma temperatura de 25°C. A taxa de deformação utilizada foi de 0,05 mm/seg (CALUÊTE, 2012).

CAPÍTULO IV

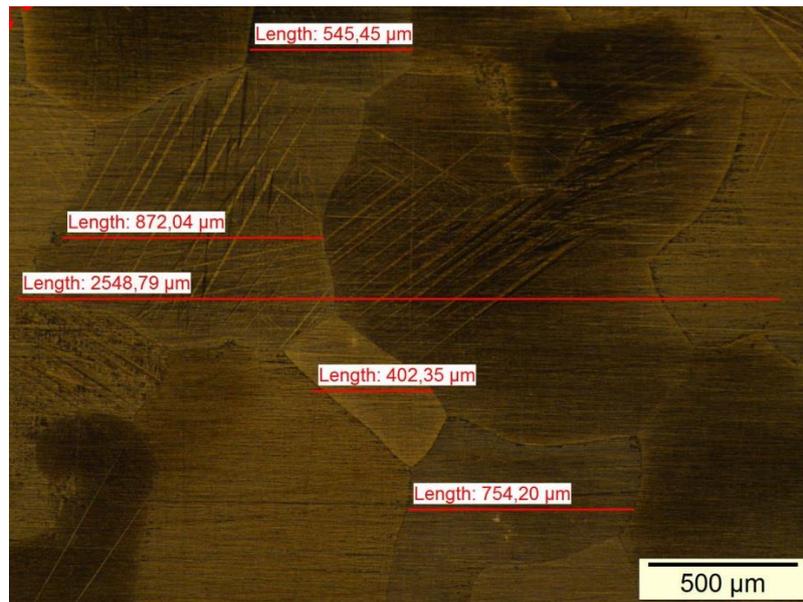
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização da liga por Microscopia Óptica

Através da microscopia óptica foi possível determinar a estrutura granular fase presente no material. Duas fases estão presentes no material: austenita e martensita (esta última caracterizada pelas agulhas no interior dos contornos de grão). Este resultado não vai de encontro à composição nominal da liga, que deveria apresentar estrutura puramente austenítica. Uma explicação para este fato pode ser a perda composicional devido a elevada umidade no dia de fundição das ligas, que estava em torno de 70%. Tal condição favorece a oxidação dos materiais, preferencialmente o Mn. Quando se tem 1% (em peso) de perda de manganês na liga significaria um aumento nas temperaturas de transformação em 100°C, ocasionando assim, o surgimento da uma segunda fase.

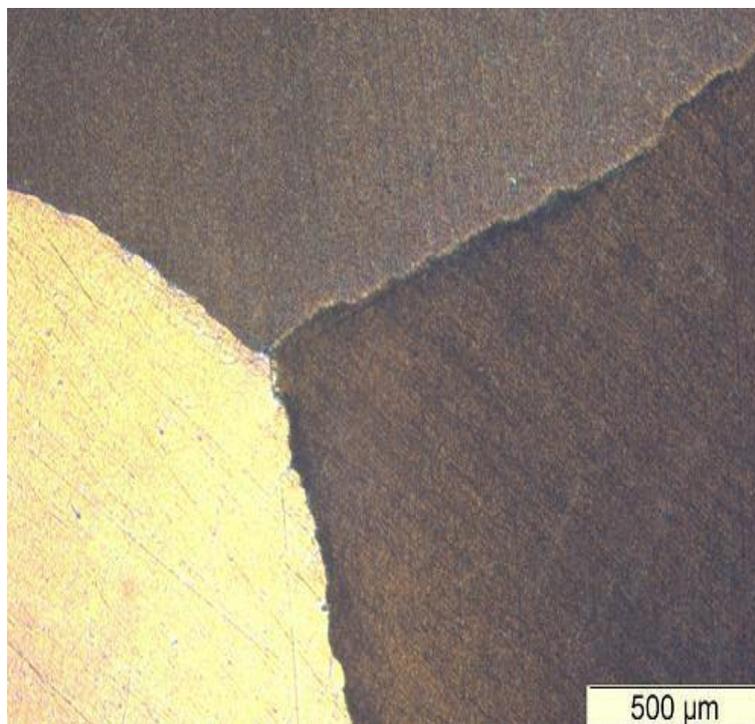
A adição de Fe na liga visou o refino granular da microestrutura, uma vez que tal elemento atua como inoculante e favorece a nucleação heterogênea. Através da Figura 9 foi determinado que o tamanho médio de grão da liga é de 569 μm . Em comparação com uma liga sem refinador (CALUÊTE, 2012), houve um refinamento considerável do grão após a adição de um quarto elemento, se comparado à liga com 3 elementos (Figura 10).

Figura 9 - Microscopia da Liga Cu-81,85% - Al-8,15% - Mn-9,5% - Fe-0,5% (% em peso).



Fonte: Autor.

Figura 10 - Fase austenita na liga Cu 78,3% - Al 9,8% - Mn 11,9%.



Fonte: CALUÊTE, 2012.

4.2. Ensaio de tração

Através de ensaios de tração, foi possível determinar tensão de indução, limite de resistência a tração do material e sua capacidade de alongamento (Tabela 2). Pode-se perceber pela Tabela 3 que, para os corpos de prova ensaiados, a tensão média de indução foi 42,7 Mpa, o limite de resistência a tração médio foi 236,09 Mpa e seu alongamento médio até a ruptura foi de 11,87%. Em comparação com a liga estudada por CALUÊTE (2012), sem refinadores, pode-se perceber na comparação feita na Tabela 3, uma diminuição do da tensão média de indução e também do limite de resistência a tração. Contudo, houve um aumento de 8,47% no alongamento médio dos corpos de prova.

Tabela 2 – Propriedades das ligas com refinador.

	Tensão de indução	Limite de resistência a tração	Alongamento
Corpo de prova 1	43 MPa	217,173 Mpa	10,16%
Corpo de prova 2	47,3 Mpa	195,227 Mpa	9,44%
Corpo de prova 3	37,8 Mpa	295,862 Mpa	13,67%

Fonte: Autor.

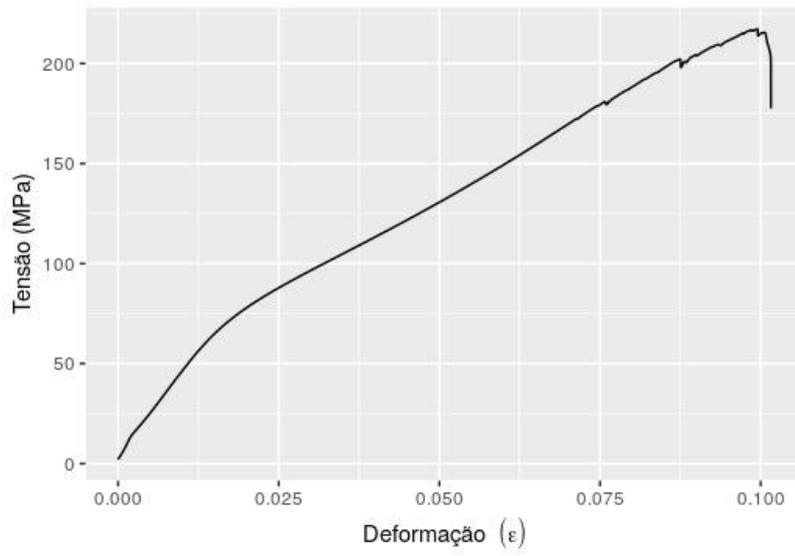
Tabela 3 – Propriedades médias das ligas com e sem refinador.

	Liga Cu-81,85% - Al-8,15% - Mn-9,5% - Fe-0,5% (% em peso)	Liga Cu-78,3% - Al-9,8% - Mn-11,9% (% em peso)
Tensão média de indução	42,7 Mpa	270 Mpa
Limite de resistência a tração médio	236,09 Mpa	326 Mpa
Alongamento médio	11,87%	3,4%

Fonte: Autor

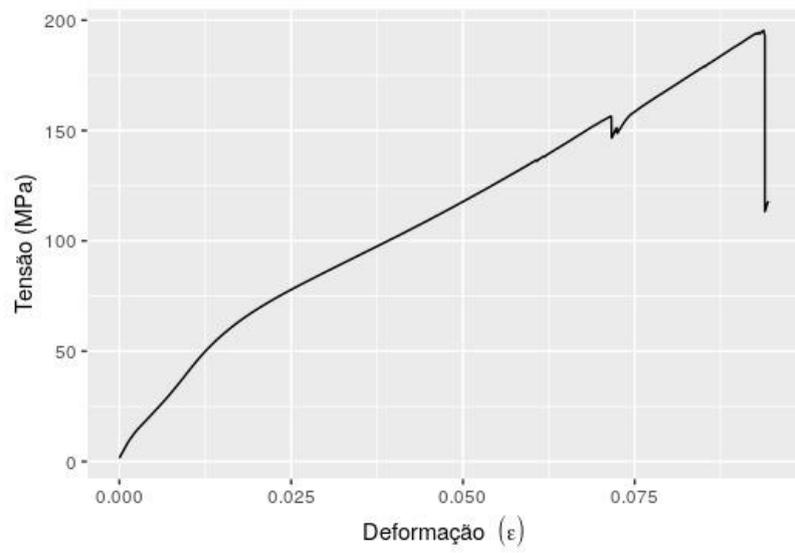
Nas Figuras 11, 12 e 13 temos representado as curvas Tensão x Deformação dos corpos de prova analisados.

Figura 11 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova 1.



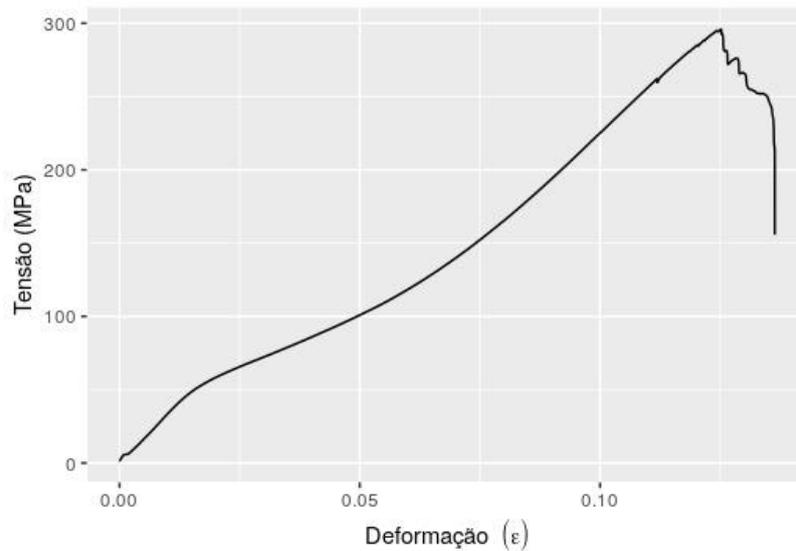
Fonte: Autor.

Figura 12 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova 2.



Fonte: Autor.

Figura 13 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova 3.



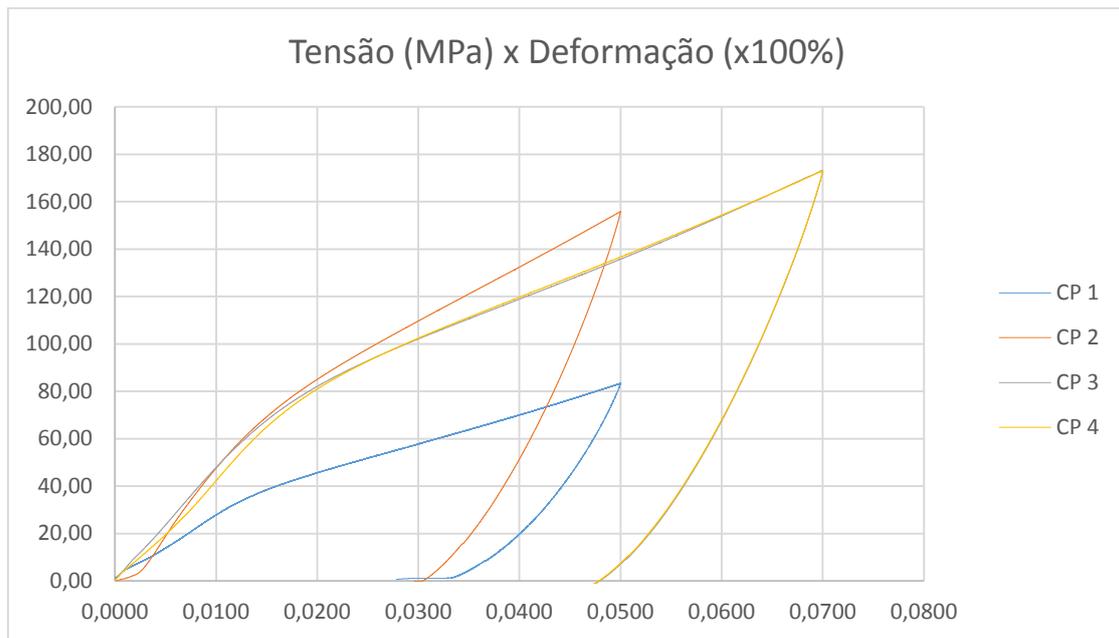
Fonte: Autor.

4.3. Ensaio de Superelasticidade

Através da fig. 14, foi possível determinar a curva de superelasticidade para corpos de prova submetidos a deformações de 5% e 7%. É possível perceber que para os corpos de prova deformados até 5%, a recuperação de forma foi, em média, 36,6% de seu comprimento deformado. Já para as amostras com deformação até 7%, a recuperação alcançada foi de 31,4%.

Este resultado corrobora com a microestrutura encontrada na microscopia. Uma vez que temos a fase martensítica presente à temperatura do ensaio (ver figura 14), a medida que as amostras são deformadas mais martensita será induzida por tensão, de modo que ao ser retirada a carga, uma maior quantidade de martensita retida permaneça nas amostras, reduzindo assim sua capacidade superelástica.

Figura 14 - Comparação dos ensaios de superelasticidade .



Fonte: Autor.

A liga sem refinador, estudada por CALUÊTE (2012), apresentou uma recuperação elástica de aproximadamente 40%, para uma deformação de 5%. Com isto pode-se concluir que a adição do refinador pouco interferiu na recuperação elástica da liga Cu-Mn-Al.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÃO

1. O Fe, exerceu o seu papel de refinador de grão;
2. As condições de processamento, como a umidade, por exemplo, provavelmente contribuíram para a perda composicional da liga, que deveria apresentar apenas a fase austenita ao invés de ser bifásica (austenita e martensita);
3. A liga com adição do refinador Fe apresentou mais capacidade de alongamento. Porém, possui uma menor resistência mecânica quando comparada a liga sem refinador;
4. A liga apresentou comportamento superelástico prejudicado pela presença de duas fases em temperatura ambiente, sem importantes melhorias quando comparada com a liga sem refinador.

CAPÍTULO VI

6. BIBLIOGRAFIA

BALDAM, Roquemar L.; VIEIRA, Estéfano A. Fundição: Processos e tecnologias correlatas. Editora Érica, v. 13, 2013;

CALUÊTE, Rafael Evaristo et al. Estudo das propriedades termomecânicas da liga cu 78, 3%-al 9, 8% mn 11, 9%. 2012;

CASTILHO, W. S.; SILVA, E. P. Algumas aplicações das ligas com memória de forma. Scientific Journal of the Federal Institute of São Paulo-Sinergia, v. 12, n. 1, p. 99-108, 2011;

CHIAVERINI, VICENTE, *Aços e ferros fundidos*, 7^a ed., Academia Brasileira de Metais, São Paulo, 1986;

DELAEY, L. et al. Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. Journal of Materials Science, v. 9, n. 9, p. 1521-1535, 1974.

GOMES, Rodinei Medeiros et al. Pseudoelasticity of Cu-13.8 Al-Ni alloys containing V and Nb. In: Advances in Science and Technology. Trans Tech Publications, 2008. p. 101-107.

KRISHNAN, Ranjani V. et al. Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. Journal of Materials Science, v. 9, n. 9, p. 1536-1544, 1974;

LAGOUDAS, Dimitris C. (Ed.). Shape memory alloys: modeling and engineering applications. Springer Science & Business Media, 2008;

OLIVEIRA, Dannel Ferreira de et al. Determinação das propriedades termomecânicas de ligas Cu-Al-Ni e Cu-Al-Be com efeito memória de forma para utilização como atuadores mecânicos. 2009;

SCHWARTZ, M., 2009, Smart Materials. 1ª ed. Boca Raton, CRC Press;

SIEGEL, M. et al. Processos de Fundição: generalidades, considerações gerais sobre a escolha do processo, importância relativa dos diversos processos. Associação Brasileira de Metais–ABM, 1978.

VELOSO, A. C. R. Elaboração e Caracterização de Ligas Cu-Al-Ni-Nb com Efeito Memória de Forma. Msc. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa-PB;