



# ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA PASSÍVEL DE MEMÓRIA DE FORMA Cu-Mn-Al COM ADIÇÃO DE INOCULANTES COM VISTAS EM UTILIZAÇÃO COMO ATUADORES MECÂNICOS

Danilo Maia de Oliveira<sup>1</sup>  
Rafael Evaristo Caluête<sup>2</sup>

## RESUMO

As ligas com efeito memória de forma (LMF) constituem uma importante família de materiais inteligentes e devido à sua capacidade de trabalhar como atuadores mecânicos vêm encontrando aplicações crescentes no campo da engenharia e no setor de petróleo e gás, em virtude da capacidade que essas ligas demonstram em memorizar uma forma previamente estabelecida quando submetidos a uma variação de temperatura, graças a uma transformação martensítica reversível. Neste trabalho foi utilizado a liga a base Cu-Al-Mn que são comercialmente mais baratas para as aplicações práticas da superelasticidade (SE) e o efeito de memória de forma (EMF), em relação as ligas Ni-Ti que são amplamente utilizadas. A liga foi obtida por fundição, homogeneizada, temperada e caracterizada por microscopia óptica e difração de raios X. Foram investigados os efeitos de refino de grão a partir da adição dos inoculantes Nb e Fe de modo a propiciar a aplicação desses materiais para a confecção de uma luva para união de tubulações mecânicas sob o efeito memória de forma. Foi observado que a adição desses inoculantes modificou a estrutura granular do material de maneira positiva no tocante a aplicação como atuadores mecânicos.

**Palavras-chave:** Ligas com efeito memória de forma, Atuadores, Propriedades mecânicas, Refinadores de grão.

## INTRODUÇÃO

Nas décadas recentes, foram realizadas várias iniciativas promissoras em ciência dos materiais que podem vir a revolucionar o futuro desta área do conhecimento. Dos grupos de matérias, um se destaca, os chamados materiais inteligentes, caracterizados como um grupo de novos materiais de última geração, que estão sendo atualmente desenvolvidos e que terão uma influência significativa sobre muitas tecnologias. Entre os materiais inteligentes mais importantes tecnologicamente encontramos as ligas com efeito memória de forma (LMF), termo utilizado para caracterizar uma série de materiais metálicos que possuem alta capacidade de recuperação da sua forma previamente definida, após serem submetidos a um ciclo termomecânico apropriado (RAMOS, 2018).

As LMF são uma categoria de material inteligente que afetará profundamente os principais ramos da indústria e estão ganhando atração por possíveis aplicações devido a sua

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, danilo-maia@hotmail.com;

<sup>2</sup> Orientador do trabalho: Prof. Doutor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, rcaluete@gmail.com;



confiabilidade e multifuncionalidade. Uma dessas aplicações são os dispositivos que podem operar como atuadores mecânicos, como exemplo a produção de Luvas com LMF para acoplamento em tubulações. Por sua facilidade de utilização prática, as uniões por flanges são amplamente utilizadas em estruturas de engenharia. Contudo, essas uniões exibem dificuldades no que diz respeito à manutenção da força de acoplamento por grandes períodos, devido a carregamentos dinâmicos. No setor de petróleo e gás, falhas em uniões parafusadas podem provocar insegurança em plataformas *Onshore* e *Offshore*, com vazamentos por meio de juntas parafusadas em tubulações.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é estudar as propriedades mecânicas da liga passível de memória de forma Cu-Mn-Al com adição de inoculantes através da microscopia óptica e difratometria de raios-x com vista na utilização da liga como atuadores mecânicos.

## **METODOLOGIA**

Os ensaios laboratoriais referentes a este estudo foram realizados no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) no período 01/08/2019 a 31/07/2020, sob coordenação do Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rafael Evaristo Caluête.

### Elaboração da Liga

A liga selecionada para esta pesquisa é a base de cobre e os componentes das ligas foram cortados e então pesados com o auxílio de uma balança Shimadzu, modelo AUX 320. Para a adição dos inoculantes Ferro e Nióbio, foram feitos dois testes, para 0,25% de Fe e 0,25% de Nb e outro para 1% de Fe e 0,5% de Nb, sendo utilizado uma liga mãe de Al-Fe, com 75% de Alumínio e 25% de Ferro, e como a LMF já é de Cu-Al-Mn, a quantidade do elemento Alumínio levou em consideração as proporções da liga mãe.

### Fundição das Ligas

Com as composições determinadas e os elementos e/ou ligas mães devidamente pesados, a próxima etapa consistiu na fundição do material. Para tal foi utilizado um forno elétrico de indução da INDUTHERM, modelo MU 400 (Figura 1) A ordem das deposições foi Cobre, Manganês e Al-Fe devido a propriedade exotérmica do Alumínio. A temperatura máxima do forno atingia 1300°C, após a fundição da liga, o metal líquido foi vazado nos moldes metálicos confeccionados em aço 1045, para então, após a solidificação, procedermos com o restante do trabalho.



Figura 1 - INDUTHERM MU 400



Fonte: LSR UFPB (2020)

Foi utilizado um cadinho removível, feito em argila e grafite com luva cerâmica para isolamento térmico, que pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Cadinho



Fonte: LSR UFPB (2020)

### Tratamentos Térmicos

Para melhorar a dissolução dos elementos de liga no lingote, após o processo de fundição, as ligas foram homogeneizadas a 850°C durante 12 horas em um forno tipo mufla, monofásico, da JUNG, Modelo 0912 (Figura 3).

Figura 3 - Forno JUNG



Fonte: Jung (2020)

Após isto, as amostras foram confeccionadas em uma máquina de corte a fio (Eletro-Erosão) de modelo ELETROCUT AR 1300. Em seguida foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera que consistiu no aquecimento da liga à 850°C durante 30min em um forno tipo mufla e resfriamento brusco em água a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C), para a obtenção do efeito de memória de forma.



## Microscopia

A análise microestrutural das amostras foi feita em um microscópio óptico AXIOTECH 30, com lentes Carl Zeiss com auxílio do software ANALYSYS. A Partir do lingote obtido foi realizado um corte transversal a partir do qual se pode observar a morfologia da liga em estudo. A amostra foi lixada mecanicamente em lixas 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200 e receberam acabamento com alumina 1  $\mu\text{m}$ , até a superfície ficar isenta de riscos. Para visualização dos contornos de grão, as amostras foram atacadas quimicamente em solução aquosa com Cloreto de ferro a 10% ( $\text{FeCl}_3$ ). No ataque, a amostra foi submersa sob agitação do banho durante 10s e em seguida a superfície foi limpa com álcool isopropílico e secada com fluxo de ar quente para posterior análise no microscópio óptico. Para determinação do tamanho médio de grão, traçou-se uma linha em tamanho arbitrário e em escala com a figura e verificou-se a quantidade de grãos que são cortados ao longo do seu comprimento. Este método é conhecido como “Método do intercepto linear (Heyn)”. Em seguida as microestruturas das amostras metalográficas foram determinadas por microscopia óptica.

## Difratometria de Raios-X

As estruturas das fases presentes nas microestruturas foram identificadas por difração de raios-x. Os difractogramas foram realizados num Difratorômetro de Raios-X, modelo D5000 SIEMENS-BRUKER (Figura 4), utilizando radiação  $\text{Cu-K}\alpha$  com comprimento de onda de  $\lambda = 1,54184\text{\AA}$ . A faixa de análise foi de  $20^\circ < 2\theta < 90^\circ$ , com uma taxa de aquisição de dados de 0,02/4 (graus/s). A determinação das fases presentes foi realizada com o auxílio de cartas cristalográficas e do software EVA.

Figura 4 - D5000 SIEMENS-BRUKER



Fonte: CAE (2020)

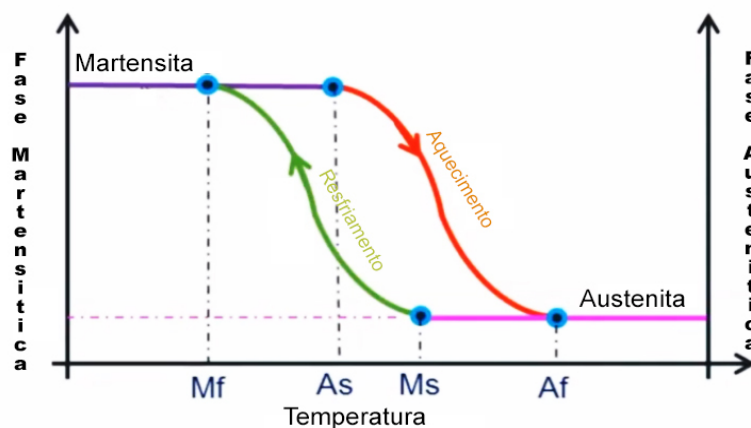


## REFERENCIAL TEÓRICO

As ligas com comportamento memória de forma (ou SMA, do inglês, *Shape Memory Alloys*) são ligas metálicas que, sob tensão reverterem à sua forma original caso a temperatura aumente acima de determinada temperatura de transformação crítica. A mudança à forma original se deve a uma mudança na estrutura cristalina quando a temperatura ultrapassa a temperatura de transformação e quando submetidas a um processo de tratamento térmico adequado (SMITH e HASHEMI, 2012).

O adjetivo “inteligente” implica que esses materiais são capazes de sentir mudanças nos seus ambientes e assim responder a essas mudanças segundo maneiras predeterminadas. Uma liga com memória da forma é polimórfica, isto é, pode apresentar duas estruturas cristalinas (ou fases), e o efeito de memória da forma envolve transformações de fases entre essas estruturas (CALLISTER e RETHWISCH, 2016). A primeira das duas fases denomina-se fase *Austenita* tem uma estrutura cúbica de corpo centrado que existe em temperaturas elevadas. A segunda fase denomina-se *Martensita* com uma estrutura que pode ser tetragonal, ortorrômbica ou monoclínica, ocorre a baixa temperatura.

Figura 5 - Gráfico de Temperatura de Transformação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As ligas LMF no seu estado livre de tensão são caracterizadas por quatro temperaturas de transformação de fase:  $M_i$  e  $M_f$  durante o resfriamento,  $A_i$  e  $A_f$  durante o aquecimento. As temperaturas  $M_i$  e  $M_f$  representam, respectivamente, o início e fim da transformação martensítica, enquanto as temperaturas  $A_i$  e  $A_f$  indicam, respectivamente, o início e fim da transformação *austenítica*. O gráfico das temperaturas de transformação de fase pode ser observado na Figura 5.

A *Austenita*, com o resfriamento, se transforma espontaneamente em uma fase *Martensita*, de modo que a transformação ocorre sem difusão e envolve uma mudança ordenada



de grupos de átomos, muito rapidamente, o grau de transformação depende da temperatura; as temperaturas nas quais a transformação começa e termina são  $M_i$  (temperatura de início da transformação da *austenita* em *martensita*) e  $M_f$  (temperatura de fim da transformação *martensítica*) (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Sob a influência da aplicação de uma tensão, a deformação da *Martensita* ocorre pela migração de contornos de maclas, algumas regiões crescem enquanto outras encolhem. Quando a tensão é removida, a forma deformada é retida nessa temperatura. Finalmente, no aquecimento subsequente até a temperatura inicial, o material reverte (isto é, “lembra”) a sua forma original. Esse processo é acompanhado por uma transformação de fases da *Martensita* deformada para a fase *Austenita* original de alta temperatura. Para essas ligas com memória da forma, a transformação da *Martensita* em *Austenita* ocorre ao longo de uma faixa de temperaturas, entre as temperaturas representadas por  $A_i$  (início da *Austenita*) e  $A_f$  (final da *Austenita*).

### Nucleação

A nucleação é definida como o surgimento da fase sólida de maneira estável dentro da fase líquida, na forma de pequenos núcleos, que vão crescer e formar cristais (APARECIDO e BALDÃO, 2014). Os dois principais mecanismos responsáveis pela nucleação de partículas sólidas em um metal líquido são nucleação homogênea e nucleação heterogênea.

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 (APARECIDO e BALDÃO, 2014).

Os metais líquidos estruturalmente consistem em átomos desordenados, em que aleatoriamente surgem regiões ordenadas se agrupando na estrutura cristalina do metal sólido correspondente. Essas regiões são chamadas de embriões.

A nucleação heterogênea caracteriza-se pela influência de elementos estranhos ao sistema, chamados de substratos, cuja energia de superfície (tensão superficial) participa do balanço energético da sobrevivência do embrião sob a forma de núcleo sólido (APARECIDO e BALDÃO, 2014).

### Refinadores de Grão (Inoculantes)

Quando se deseja conceder e/ou aprimorar as características da liga, como maior resistência mecânica, é comum buscar um processo que aumente a frequência de nucleação e, conseqüentemente, minimize o tamanho médio dos cristais sólidos. Esse processo é denominado refino de grão (APARECIDO e BALDÃO, 2014).





A adição de refinadores de grão no metal fundido é a forma mais efetiva de promover uma estrutura granular fina e uniforme através da adição de agentes nucleantes.

Adiciona-se então elementos ternários e quaternários, podendo esses servir como refinadores de grão, vindo a proporcionar a diminuição de temperatura de transformação e aperfeiçoar as propriedades mecânicas (ERGEN, UZUN, *et al.*, 2013)

Adicionar esses substratos heterogêneos com alto poder de nucleação favorecem o refino. Essas adições, chamadas de inoculantes, são dispersas uniformemente no metal líquido. Assim, cada partícula atua como um substrato localizado para nuclear a fase sólida (APARECIDO e BALDÃO, 2014).

### Microscopia óptica e Caracterização das Ligas

A microscopia óptica é utilizada para estudar a microestrutura, com o microscópio óptico e seu sistema de iluminação. Para os materiais opacos à luz visível (todos os metais), apenas a superfície está sujeita à observação, e o microscópio óptico deve ser usado no modo de reflexão. As investigações desse tipo são frequentemente denominadas metalográficas, uma vez que os metais foram os primeiros materiais a serem examinados com o emprego dessa técnica (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

### Difração de Raios X (DRX)

Adifração de raios X é uma ferramenta poderosa usada para medir a cristalinidade, as técnicas de difração permitem determinar a estrutura dos sólidos cristalinos. Utiliza-se uma amostra de metal de maneira que exista uma orientação aleatória de muitos cristais, assegurando assim, que algumas das partículas estejam orientadas, em relação ao feixe de raios X, de modo a satisfazer as condições de difração da lei de Bragg (SMITH e HASHEMI, 2012). Em um equipamento de difração de raios X, uma fonte emite radiação contra essa amostra e um detector recebe os feixes difratados.

### Liga Cu-Mn-Al

As ligas à base de Cu e Fe são comercialmente atraentes para as aplicações práticas da superelasticidade (SE), o efeito de memória de forma (EMF) e estão chamando a atenção como alto amortecimento. Entre essas ligas, as LMF à base de Cu têm menor custo do que as ligas à base de Ni-Ti e mostram melhores EMF e SE do que as ligas à base de Fe e são as ligas mais atraentes para aplicações práticas. Contudo, as LMF policristalinas à base de Cu, como Cu–Al–Ni e Cu–Zn–Al são frágeis demais para serem suficientemente trabalhados a frio devido ao alto



grau de ordem e alta anisotropia elástica na fase. Já as ligas Cu–Al–Mn com um baixo teor de Al menor que 18 a.% mostram excelente ductilidade porque a fase detém uma estrutura que possui um baixo grau de ordem (KAINUMA, TAKAHASHI e ISHIDA, 2004).

As ligas a base de cobre apresentam boas performances em termos de propriedades termoelásticas podendo ser utilizadas em diversas aplicações tecnológicas. A principal vantagem das ligas à base de cobre é econômica (PAIVA, BRAGA e SAVI, 2004). Além disso as LMF baseadas em Cu de baixo custo foram investigadas e desenvolvidas, com vantagens em condutividades elétricas, térmicas e deformabilidade, em comparação com as LMF baseadas em Ti-Ni (OTSUKA e WAYMAN, 1998).

Contudo, uma das dificuldades encontradas é a fragilidade (comum as ligas a base de cobre) a elevada temperatura de transformação o que as tornariam inviáveis para aplicações práticas. Estes inconvenientes são geralmente atribuídos a características microestruturais das ligas com EMF.

Todavia, recentemente mostrou-se que é possível desenvolver-se ligas Cu-Al-Mn, que modificadas com a adição de elementos de liga e a aplicação do controle da microestrutura alcançado por tratamento termomecânico, podem apresentar baixas temperaturas de transformação, boa recuperação de forma e propriedades mecânicas compatíveis com a utilização dessas ligas como atuadores (KAINUMA, TAKAHASHI e ISHIDA, 2004).

#### Aplicações das LMF na indústria de petróleo e gás

Nos últimos anos, o uso da liga com comportamento memória de forma (LMF) como um componente em diversas aplicações, atraiu mais interesses especialmente no campo da mecânica. A indústria *Onshore* e *Offshore* é um setor vasto e com potenciais perigos para quem trabalha em campo. Os locais extremos e as condições adversas inerentes à operação no mar aumentam a complexidade e os riscos que, por natureza, fazem parte da pesquisa e recuperação de recursos naturais. Os recursos adaptativos das ligas com memória de forma os tornam candidatos atraentes para fornecer um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente. Um número crescente de ligas com memória de forma com aplicações e patentes baseadas na indústria de petróleo e gás atestam esse fato (SONG, PATIL, *et al.*, 2010).

As características positivas de boa confiabilidade, alta densidade de energia, simplicidade de projeto, compactidade na configuração e operação silenciosa, apontam o LMF como um candidato promissor para atuador (HONGYAN, YANJIAN e ERIC, 2010).

Muitas aplicações de conexão e vedação usadas na indústria dependem do efeito memória de forma. Na indústria de petróleo e gás, os pesquisadores tentam investigar o uso





desse efeito na criação de fixadores de conexão subaquáticos, acopladores ou conectores incorporados.

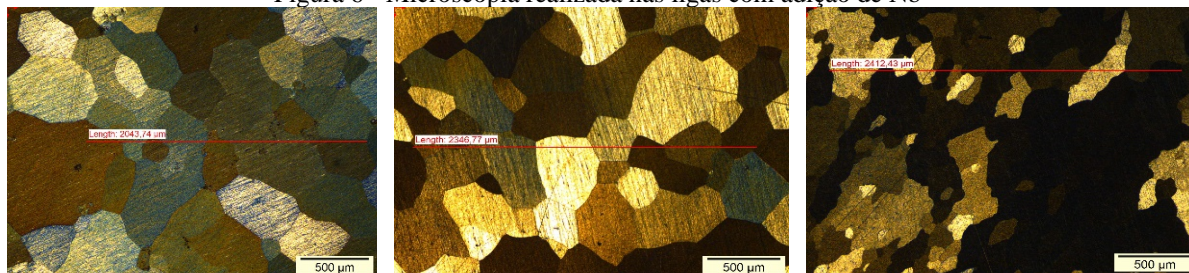
Os métodos tradicionais de fixação com parafusos e porcas são demorados, caros e requerem atenção especial para que cada conexão seja perfeita. Conseqüentemente, surge uma dificuldade quando tenta-se aprimorar esses métodos para aplicações de grande escala. Uma possível solução para esse problema é a utilização de fixadores de aperto automático, feitos de liga com efeito memória de forma (POST, 2004).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Microscopia da liga Cu-Mn-Al-Nb-Ni

Abaixo na Figura 6 é possível observar o resultado da microscopia realizada nas ligas com adição de Nb. Percebe-se uma redução do grão austenítico com o aumento do teor do inoculante. O tamanho de grão, quando comparado a liga sem refinador estudada por Caluête (2012), teve uma redução percentual importante, como é possível visualizar no Quadro 1. Este resultado indica que o elemento nióbio contribui positivamente para ativar a nucleação heterogênea no material, resultando assim em resultado próximo daquele obtido por Oliveira (2009) em seu estudo da liga Cu-Al-Be-Nb-Ni.

Figura 6 - Microscopia realizada nas ligas com adição de Nb



Fonte: Caluête (2012)

Quadro 1 - Redução percentual

%Nb	Tamanho Médio do Grão ( $\mu\text{m}$ )
0,25	329,25
0,5	260,75
1,0	172,36

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### Microscopia da liga Cu-Mn-Al-Fe

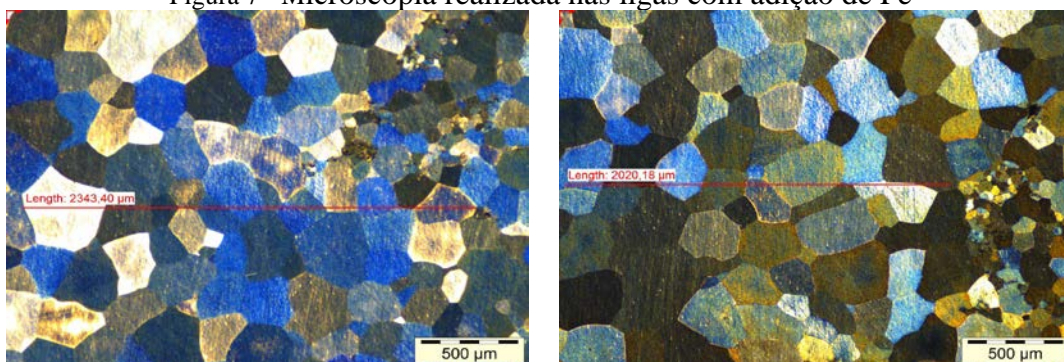
Abaixo na Figura 7 é possível observar o resultado da microscopia realizada nas ligas com adição de Fe. Percebe-se, também, que uma redução do grão austenítico com o aumento do teor do refinador. Fazendo a mesma comparação com a liga estudada por Caluête (2012),



percebe-se que houve uma redução percentual importante, como é possível visualizar no Quadro 2.

Este resultado indica que o elemento Fe adicionado à liga base Cu-Mn-Al também contribui positivamente para ativar a nucleação heterogênea no material, resultando assim em resultado próximo daquele obtido por Oliveira (2009) em seu estudo da liga Cu-Al-Be-Nb-Ni.

Figura 7 - Microscopia realizada nas ligas com adição de Fe



Fonte: Caluête (2012)

Quadro 2 - Redução percentual

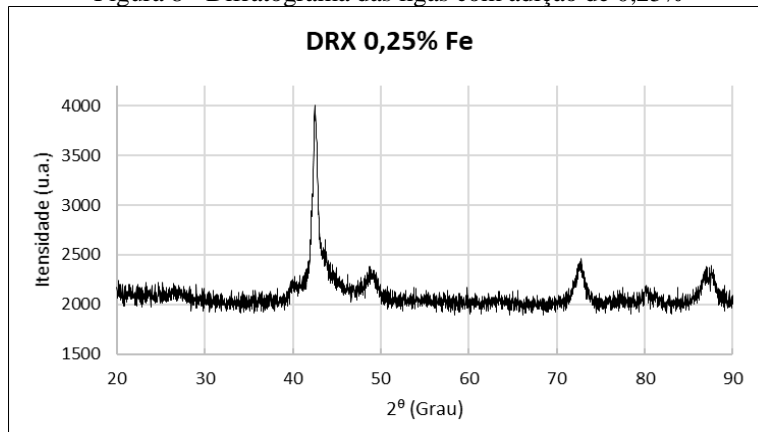
%Fe	Tamanho Médio do Grão (μm)
0,25	180,00
1,0	224,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### Difração de Raios-X da liga Cu-Mn-Al-Fe

Abaixo pode ser observado o difratograma das ligas com adição de 0,25 e 1,0% de Fe. Pode-se observar para os dois gráficos, em ângulos de difração próximos a valores de  $2\theta$  iguais a  $42^\circ$  e  $73^\circ$ , a presença de picos característicos da fase  $\beta'$  com estrutura 18R, condizente com a fase apresentada na Figura 8 e Figura 9 (microscopia).

Figura 8 - Difratograma das ligas com adição de 0,25%

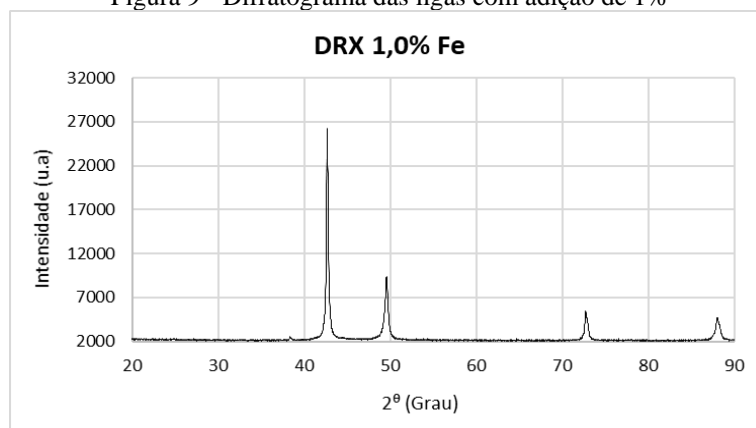


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)



As ligas com memória de forma possuem picos característicos de suas fases austenita e martensita. Ao se obter o difratograma de uma amostra, comparasse os picos obtidos no ensaio com aqueles conhecidos na literatura e, a partir disso, é possível determinar a presença de uma fase característica naquele material.

Figura 9 - Difratograma das ligas com adição de 1%



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, examinamos o método de produção e os efeitos da adição de Fe e Nb as propriedades microestruturais da liga com efeito memória de forma (LMF) Cu-Al-Mn, obtida via fusão em forno de indução. E com base nos resultados obtidos através da microscopia óptica e da análise realizada pela Difração de Raios-X, pode-se concluir que a partir da adição dos inoculantes à base de Fe e Nb, notou-se uma redução do grão austenítico com o aumento do teor dos inoculantes adicionados. Com isso, foi possível reduzir o tamanho dos grãos da liga Cu-Al-Mn, quando comparado a liga sem refinador de grão, o que poderá acarretar em melhores propriedades mecânicas ao material desenvolvido. É importante ressaltar ainda que com a diminuição do tamanho de grão com o aumento do teor de ferro presente, pode-se baratear ainda mais a produção de ligas metálicas uma vez que o Fe é uma das principais impurezas da maioria das ligas, com o silício, ou seja, diminuiu o custo do refino.

Finalmente, podemos concluir que a capacidade da liga com efeito memória de forma Cu-Al-Mn pode ser efetivamente aprimorada pela adição dos refinadores de grão (inoculantes) Fe e Nb, o que torna essas ligas mais viáveis para aplicações tecnológicas como a produção de atuadores mecânicos. Como sugestão para trabalhos futuros a possível fabricação de um atuador, a partir desta LMF estudada, do tipo Luva para união de tubulações.



## REFERÊNCIAS

- APARECIDO, V. E.; BALDÃO, R. D. L. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. São Paulo: Editora Saraiva, 2014.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução, 9ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016.
- CALUÊTE, R. E. **Estudo das propriedades termomecânicas da liga Cu 78,3% - Al 9,8% Mn 11,9%**. João Pessoa: Dissertação/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/Cursos de Mestrado/CT/UFPB, 2012.
- ERGEN, S. et al. Shape memory properties and microstructural evolution of rapidly solidified CuAlBe alloys. **Materials Characterization**, Elsevier BV, 16 Março 2013.
- HONGYAN, L.; YANJIAN, L.; ERIC, A. Hysteresis behaviour. **Shape Memory Alloys**, Croatia. Sciyo, 2010. 61-79.
- KAINUMA, R.; TAKAHASHI, S.; ISHIDA, K. Characteristics of Cu–Al–Mn-based shape memory alloys. **Materials Science and Engineering**, Elsevier BV, 2004.
- OLIVEIRA, D. F. D. **Determinação das Propriedades Termomecânicas de Ligas Cu-Al-Ni E Cu-Al-Be Com Efeito Memória de Forma para utilização como Atuadores Mecânicos**. João Pessoa: UFPB., 2009.
- OTSUKA; WAYMAN. **Shape Memory Materials**. Melbourne: Cambridge University Press, 1998.
- PAIVA, A.; BRAGA, A.; SAVI, M. **Modelagem do Comportamento Termodinâmico das Ligas com memória de Forma**. Rio de Janeiro: PUC Rio, 2004.
- POST, A. **Self-torquing Fasteners**. USA patent #6,688,828 B1, 10 Fev. 2004.
- RAMOS, A. D. D. O. E. A. **Estudo do comportamento de fios de liga NiTi com memória de forma em regime superelástico: avaliação de fadigas funcional e estrutural**. 2018.
- SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre: Mcgraw Hill, 2012.
- SONG, G. et al. Applications of Shape Memory Alloys in Offshore Oil and Gas Industry: A Review. **Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments**, Houston, 2010.