

EFEITO DO RECOZIMENTO NAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE NA LIGA $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$

Kaline Ventura Batista
Julyana Maria de Medeiros Quirino
Universidade Federal da Paraíba,
kalineufcg@gmail.com; julyanaquirino@yahoo.com.br

Francisco Riccelly Pereira Feitosa
Universidade Federal do Piauí
riccellypfeitosa@gmail.com

Cícero da Rocha Souto
Universidade Federal da Paraíba
cicerosouto@cear.ufpb.br

Resumo: Nos últimos anos, as ligas ferromagnéticas da família Ni–Mn–Ga têm sido extensivamente estudadas por vários grupos de pesquisas devido à sua propriedade de memória de forma magnética, ou seja, essas ligas apresentam considerável deformação quando expostas a um campo magnético. As ligas com memória de forma magnética (magnetic shape memory alloy – MSMA) apresentam alto potencial como uma classe emergente de materiais inteligentes que podem funcionar tanto como atuadores quanto como sensores para uma nova geração de componentes digitais simples e rápidos que produzem alto desempenho mecânico em um espaço limitado possibilitando a obtenção de atuadores miniaturizados leves e compactos aliada à redução de custos. Para o projeto e modelamento de sistemas com acionamento por campo magnético é necessário definir a composição química, o processo produtivo assim como os parâmetros do tratamento térmico, visto que são os principais fatores que influenciam diretamente não apenas as temperaturas de transformação mas também as propriedades magnéticas. Esse contexto motivou o desenvolvimento desta pesquisa, que objetivou analisar o efeito do tratamento térmico de recozimento nas temperaturas de transformação de fase em ligas policristalinas da família Ni–Mn–Ga. A metodologia adotada consistiu na fabricação das ligas magnéticas policristalinas com composição nominal inicial de $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$ via fundição por indução, em seguida foi realizado o recozimento a 1000 °C por 6 horas em ambiente controlado com atmosfera de argônio. A caracterização termomecânica do material foi determinada com o ensaio de análise de calorimetria exploratória diferencial para determinação das temperaturas de transformação de fase. Através da comparação dos resultados obtidos das amostras no estado bruto de fusão e recozida pôde ser observado que houve acentuação dos picos indicadores de transformação de fase da liga, assim como mudança na variação das temperaturas iniciais e finais das fases martensítica e austenítica. Foi possível concluir que os parâmetros adotados no tratamento de recozimento possibilitou a estabilização da fase martensítica em temperatura ambiente.

Palavras-chave: Ligas Heusler; Ligas com memória de forma magnética; Ni–Mn–Ga.

1. INTRODUÇÃO

A descoberta das ligas Heusler, no início do século XX, causou um impacto considerável no campo do magnetismo. O desenvolvimento científico sobre as ligas Heusler pôde constatar a grande versatilidade que essa nova classe de compostos oferece. As ligas dessa categoria chamam a atenção devido às suas importantes características, como efeito de memória de forma magnética, efeito magnetocalórico e grande efeito de magnetorresistência (Acet e Mañosa, 2011; Dal; Demirel; Eskil, 2020).

As propriedades de memória de forma magnética são as funcionalidades mais conhecidas dos compostos Heusler. Grandes deformações dessas ligas são obtidas por meio da reorientação de variantes martensíticas nas quais os contornos de macla são altamente móveis. Essa reorientação pode ser produzida por tensões e/ ou por campo magnético. O comportamento complexo exibido por esses materiais é, principalmente, uma consequência do forte acoplamento entre o magnetismo e a estrutura que é impulsionada pela transição martensítica (Acet e Mañosa, 2011; Maji, 2017; Ullakko *et al.*, 2001).

O que torna as ligas com memória de forma magnética (magnetic shape memory alloy – MSMA) distintas das ligas de memória de forma comum, e o que as torna únicas entre qualquer material, é que a microestrutura da martensita pode ser manipulada quando exposta a um campo magnético. Isto pode levar a grandes deformações macroscópicas induzidas apenas pelo campo magnético. Além disso, essas mudanças podem ser “lembradas” pela microestrutura da martensita.

Com a descoberta desta grande deformação, as ligas Heusler deram um segundo impacto à pesquisa quase um século após sua primeira descoberta, dando um avanço na busca por atuadores acionados por campo magnético (M. Acet *et al.*, 2011)

Ligas da família Ni-Mn-Ga pertencem à classe das ligas com memória de forma magnética que atraíram grande interesse nos anos recentes devido a suas potenciais aplicações práticas. Esta liga exibe o efeito de memória de forma magnética quando submetida a um campo magnético, o que a faz apropriada para aplicações em sensores e atuadores (Zhou, 2016).

As ligas monocristalinas apresentam a maior deformação já reportada na comunidade científica, porém o alto custo e a dificuldade na produção fortalece o desenvolvimento de ligas policristalinas. As ligas Ni-Mn-Ga policristalinas demonstraram desenvolver deformação induzida por campo magnético moderado quando as restrições de contorno de grão são suficientemente reduzidas, por exemplo, aumentando a porosidade ou introduzindo uma textura cristalográfica forte. Melhorar as propriedades das ligas pelo processo de produção, composição química e parâmetros de recozimento para fabricação de dispositivos funcionais e o alto custo para produção de ligas monocristais em Ni-Mn-Ga, são os principais focos de pesquisa atualmente (Li *et al.*, 2020; Maji, 2017).

Esse contexto motivou o desenvolvimento desta pesquisa, que objetivou analisar o efeito do tratamento térmico de recozimento nas temperaturas de transformação de fase ligas policristalinas da família Ni-Mn-Ga.

2. LIGAS DA FAMÍLIA NI-MN-GA

As ligas Heusler são bem conhecidas como candidatas adequadas para muitas aplicações devido à sua estrutura eletrônica única e ajustável, que influencia as propriedades físicas peculiares que variam de supercondutividade, magnetocalórica, termoelétrica e efeitos de memória de forma magnética. Entre as ligas Heusler, ligas de Ni-Mn-Ga têm atraído muita atenção para pesquisa desde os primeiros anos, pois é o principal exemplo de material com memória de forma magnética (Zhang *et al.*, 2020; Král *et al.*, 2020).

Pesquisas iniciais foram reportadas por Chernenko *et al.*, (1995a), (1995b) e Chernenko *et al.*, (1994) sobre o fenômeno memória de forma, propriedades magnéticas e térmicas assim como transformações martensíticas da liga Ni-Mn-Ga, já a deformação induzida por campo magnético nesta liga foi observado pela primeira vez experimentalmente por Ullakko *et al.* no ano de 1996, que relatou indução por campo de 0,2% em um monocristal de Ni_2MnGa com um campo magnético de 0,8 T aplicado a 265 K. É possível desenvolver grandes deformações induzidas por campo magnético reversível quando, em resposta a deformação induzida por campo magnético, os domínios cristalográficos da fase martensítica são reorganizados. De acordo com Gabdullin, (2015), a deformação máxima induzida por campo magnético varia de 6 a 12% do comprimento do elemento, dependendo de sua microestrutura.

O efeito memória de forma magnética irá ocorrer quando as ligas apresentarem transformações martensíticas, é nesta fase de baixa temperatura que as propriedades são fortemente influenciadas por campos magnéticos. Martensitas, incluindo martensita não modulada (NM), modulada de dez camadas (10M) e de quatorze camadas (14M), contêm contornos de macla que podem ou não serem movido sob um campo magnético aplicado. O crescimento de uma macla, com movimento de limite de macla necessário, é responsável pela deformação induzida por campo magnético (*magnetic field induced strain* - MFIS). É importante ressaltar que MFIS só é possível enquanto o material é ferromagnético, ou seja, abaixo de sua temperatura de Curie (T_c). Ainda assim, mesmo que os requisitos acima mencionados sejam satisfeitos, a presença de limites de grão, em amostras policristalinas, reduzirá ou evitará o movimento do contorno de macla (Toman *et al.*, 2018).

A grande deformação por campo magnético apresenta-se principalmente em monocristais de Ni-Mn-Ga, mas a preparação de ligas monocristais texturizadas é muito complicada para aplicações em larga escala, tem um custo elevado e geralmente é difícil devido à severa segregação da composição química que é desfavorável para a obtenção de propriedades funcionais estáveis. Em comparação, o preparo de ligas policristalinas tem baixo custo e é muito mais fácil obter composição química homogênea. A deformação induzida devido ao campo magnético ou por tensão depende do tamanho do grão, estrutura cristalina e orientação cristalográfica das ligas Ni-Mn-Ga, sendo assim, MFIS em ligas policristalinas de Ni-Mn-Ga geralmente são pequenos devido às orientações aleatórias dos grãos e da restrição dos contornos dos grãos (Kumar *et al.*, 2021a; Liao *et al.*, 2020).

Nas ligas policristalinas o movimento dos contornos de macla é significativamente dificultado pelos limites dos grãos, portanto, geralmente não desenvolvem nenhum MFIS. No entanto, Ni-Mn-Ga policristalina demonstrou desenvolver MFIS moderado quando as restrições de contorno de grão e incompatibilidades de deformação entre grãos vizinhos são suficientemente reduzidas, por exemplo, aumentando a porosidade ou introduzindo uma textura cristalográfica. Melhorar a capacidade de fabricação de dispositivos funcionais e o alto custo para produção de ligas monocristalinas em Ni-Mn-Ga, são os principais motivos para o uso de material policristalino (Gaitzsch *et al.*, 2007; Maji, 2017; Gao *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020).

Alguns autores, (Gao *et al.*, (2003), tekgül; Şarlar; Küçük (2020), Li *et al.*, (2020b), Villa *et al.* (2020) e Laitinen *et al.* (2021)), abordam que novos métodos de produção, assim como composição, tratamento térmico, ciclagem térmica e adição de outros elementos são os principais fatores que influenciam diretamente não apenas as temperaturas de transformação mas também as propriedades magnéticas visto que são altamente dependentes da estrutura cristalina, ver Fig. 1.

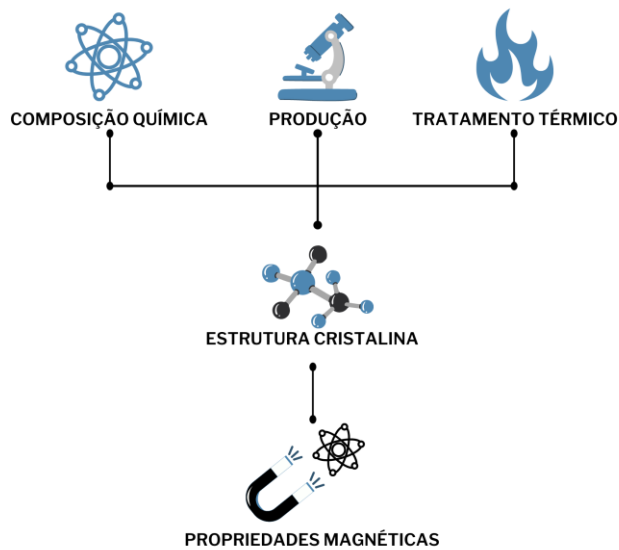


Figura 1. Fatores que influenciam diretamente as propriedades magnéticas de uma liga Heusler.
(Autoria própria, 2023)

Uma caracterização adequada de ligas com memória de forma magnética é uma pré-condição essencial para prever o comportamento ou elucidar fenômenos físicos característicos deste material para assim projetar e modelar sistemas favoráveis ao acionamento por campo magnético. Melhorar as propriedades das ligas pelo processo de produção, composição química e parâmetros de recozimento para fabricação de dispositivos funcionais e o alto custo para produção de ligas monocristais em Ni-Mn-Ga, são os principais focos de pesquisa atualmente (Li *et al.*, 2020; Maji, 2017).

2.1. Fases das ligas ternárias Ni-Mn-Ga

Após a descoberta dos compostos Heusler levou-se três décadas até que a estrutura cristalina fosse determinada. Hoje, sabe-se que as propriedades desses compostos dependem fortemente da ordem atômica. As ligas da família Ni-Mn-Ga são ligas Heusler que apresentam memória de forma tradicional e magnética, com propriedades e temperaturas de transição de fases dependentes da composição.

A transformação de fase, especialmente a fase martensítica, tem grande influência nas propriedades das ligas da família Ni-Mn-Ga, tanto estruturais como magnéticas, além de ser a origem do efeito memória de forma tradicional e magnético. As propriedades da fase martensítica são altamente dependentes da composição química da liga. Entende-se pelo chamado efeito de memória de forma a capacidade de um material lembrar sua forma original quando é deformado no estado martensítico e depois aquecido para se retransformar ao estado austenítico (Krenke *et al.*, 2005; Sardinha, 2008; Maji, 2017).

Em temperatura ambiente as ligas Ni-Mn-Ga podem apresentar uma ou duas fases distintas: Fase Austenítica e/ou Fase Martensítica. A Figura 2 apresenta a estrutura cristalina específica de cada fase.

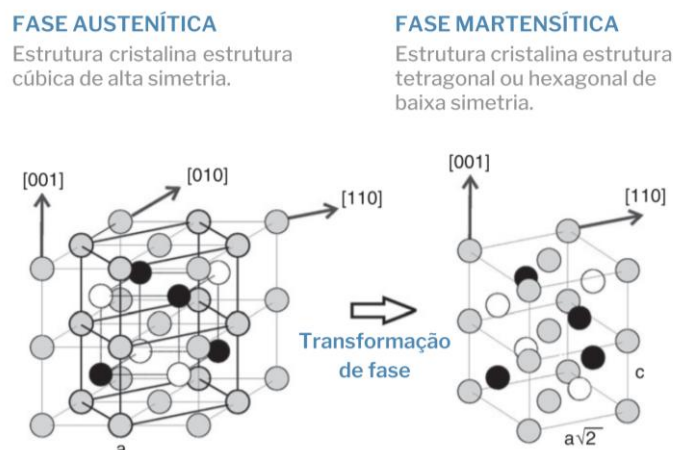


Figura 2. Fases que as ligas Ni-Mn-Ga podem apresentar em temperatura ambiente.
(Autoria própria, 2023)

A fase com estrutura cúbica com alta simetria e estável somente a altas temperaturas e possui apenas uma variante é chamada fase Austenítica, enquanto a fase com estrutura tetragonal ou hexagonal é conhecida como Martensítica. Como a temperatura de transformação martensítica é sensível à composição, comumente utiliza-se ligas de Ni-Mn-Ga com composições fora da estequiometria para estabilizar a fase martensítica à temperatura ambiente (Laptev, 2015).

A determinação das temperaturas de transformação de fase pode ser realizada pelo ensaio termomecânico Calorímetro Exploratório Diferencial (DSC). Para Matth (2011), este método DSC gera um enredo, conforme apresenta a Fig. 3, medindo a quantidade de calor emitida ou absorvida por uma pequena amostra da liga quando a mesma é refrigerada ou aquecida por meio de suas fases de transformações.

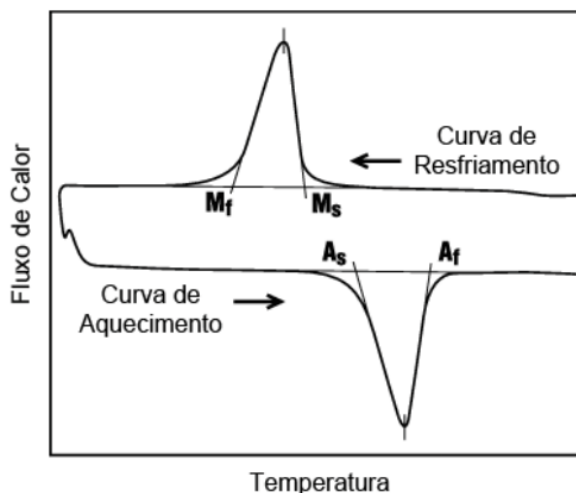


Figura 3. Tipologia de curva DSC para uma Liga de Memória de Forma (LMF) de Ni-Ti.
(Soares, 2012)

No resfriamento, a liga no estado austenítico atinge uma determinada temperatura, chamada Martensítica Inicial (M_s). Esta temperatura marca o início da mudança de fase da austenita para martensita. Após certo intervalo de temperatura toda a liga terá se transformado em martensita. A temperatura que marca este instante é chamada Martensítica Final (M_f). Abaixo dela, toda a liga se encontra no estado martensítico. No aquecimento ocorre a transformação reversa: a liga, no estado martensítico, se transforma totalmente em austenita. As temperaturas que marcam o início e o fim desta transformação são: Austenítica Inicial (A_s) e Austenítica Final (A_f).

2.2. Recozimento nas ligas com memória de forma magnética

Os processos produtivos nem sempre fornecem os materiais com as condições desejadas, sendo assim necessário submeter as peças metálicas a determinados tratamentos térmicos que objetivem melhorar suas propriedades.

É comum verificar que a melhora de uma ou mais propriedades mediante um determinado tratamento térmico é conseguido com prejuízo de outras. Assim sendo, se faz necessário que o tratamento térmico seja aplicado criteriosamente, para que as distorções verificadas sejam reduzidas ao mínimo (Chiaverini, 1986). É visto nas pesquisas sobre as ligas com memória de forma magnética que o tratamento térmico de recozimento é usualmente realizado com objetivo de melhorar as propriedades magnéticas assim como estabilizar as transformações de fase. Para tanto há dois parâmetros que influenciam diretamente no recozimento realizado em ligas com memória de forma magnética, conforme apresenta a Fig. 4.



Figura 4. Parâmetros do tratamento térmico de recozimento.
(Autoria própria, 2023)

3. MATERIAL E MÉTODOS

A sequência metodológica do desenvolvimento desta pesquisa está apresentada pelo fluxograma da Fig. 5, inicialmente obteve-se a produção das amostras, seguido pela realização do tratamento térmico de recozimento, determinação das temperaturas de transformação de fase pelo ensaio de análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e por fim análise dos resultados obtidos.

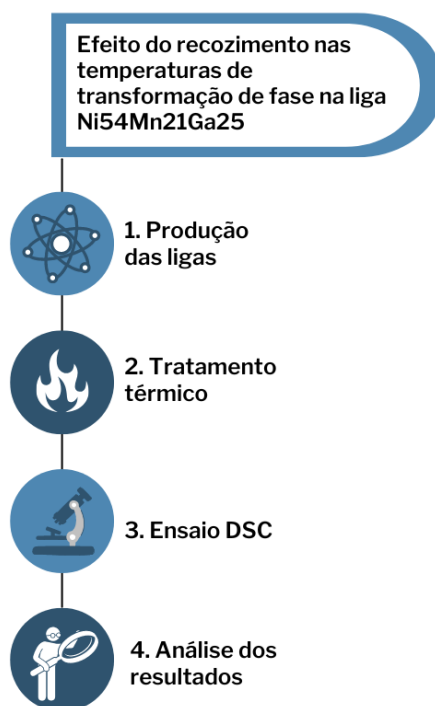


Figura 5. Sequencia metodológica utilizada no desenvolvimento desta pesquisa.
(Autoria própria, 2023)

A liga policristalina Ni₅₄Mn₂₁Ga₂₅ foi fabricada pelo processo de fundição por fusão em forno de indução equipado com cadinho de soleira fria com atmosfera de argônio disponível em laboratório no departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba. O processo de fundição foi realizado em duas etapas: foram inicialmente obtidas ligas-mãe com composição nominal Ni₄₀Mn₆₀ seguido da fabricação das ligas finais a partir da adição de níquel e gálio às ligas-mãe.

Foram utilizados constituintes de alta pureza e após a fusão inicial realizou-se uma refusão para obtenção da liga final. Para a fusão das ligas finais foi adotado um cadinho cônico de alumina fabricado sob encomenda para que o acoplamento ao forno fosse adequado.

Para a realização do recozimento foi utilizado um forno do modelo F3000 a vácuo da empresa “EDG equipamentos” disponível no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas da Universidade Federal de Campina Grande. Após a obtenção das ligas finais, as mesmas foram homogeneizadas. A Figura 6 apresenta a sequência de preparação para realização do recozimento.

Os parâmetros de tempo e temperatura foram determinados de acordo com a literatura referente a ligas policristalinas com memória de forma magnética. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de tempo e temperatura de recozimento.

Tabela 1 - Parâmetros do tratamento térmico de recozimento para todas as amostras.
(Autoria própria, 2023)

Parâmetro	Valor
Temperatura de homogeneização, Th (°C)	1000
Tempo de homogeneização, t (h)	6
Taxa de aquecimento (°C/min)	30°C/min
Taxa de resfriamento até a temperatura ambiente	Dentro do forno

SEQUENCIAMENTO DA PREPARAÇÃO PARA O RECOZIMENTO

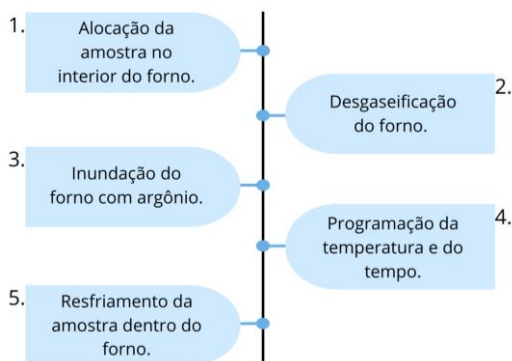


Figura 6. Sequenciamento do tratamento térmico de recozimento.
(Autoria própria, 2023)

Para obter as temperaturas de transformação de fase foi realizada a análise de calorimetria exploratória diferencial em um analisador térmico Shimadzu no modelo DSC-60, sob atmosfera de nitrogênio com taxa de fluxo de 50ml/min em um intervalo de temperaturas de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, a uma taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para todas as análises. A partir das curvas foram obtidas as temperaturas de transformação de fase através do traçado das tangentes aos picos; as áreas internas aos picos de transformação de fase serão integradas para obtenção das entalpias de transformação; e a histerese térmica foi obtida pela diferença entre as temperaturas de pico de transformação. Para uma melhor precisão, estas propriedades foram traçadas utilizando o próprio programa do equipamento DSC Q20, o Universal Analysis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As duas amostras da liga policristalina possuem formato de cone conforme apresenta a Figura 7. Este formato específico foi devido ao cadinho de alumina utilizado.

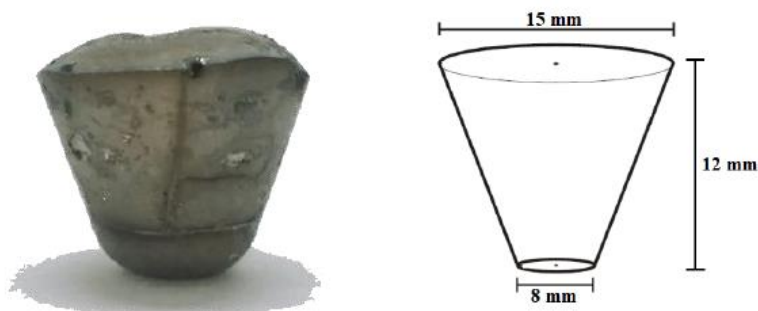


Figura 7. Amostra fundida.
(Autoria própria, 2023)

Na caracterização termomecânica a partir das curvas de DSC obteve-se as temperaturas de transformação de fase e as entalpias de transformação de fase da amostra bruta de fusão (M0) e recozida (M1) da liga policristalina $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 1. A Figura 8 e 9 apresentam as curvas das temperaturas estimadas para a amostra M0 e M1 respectivamente.

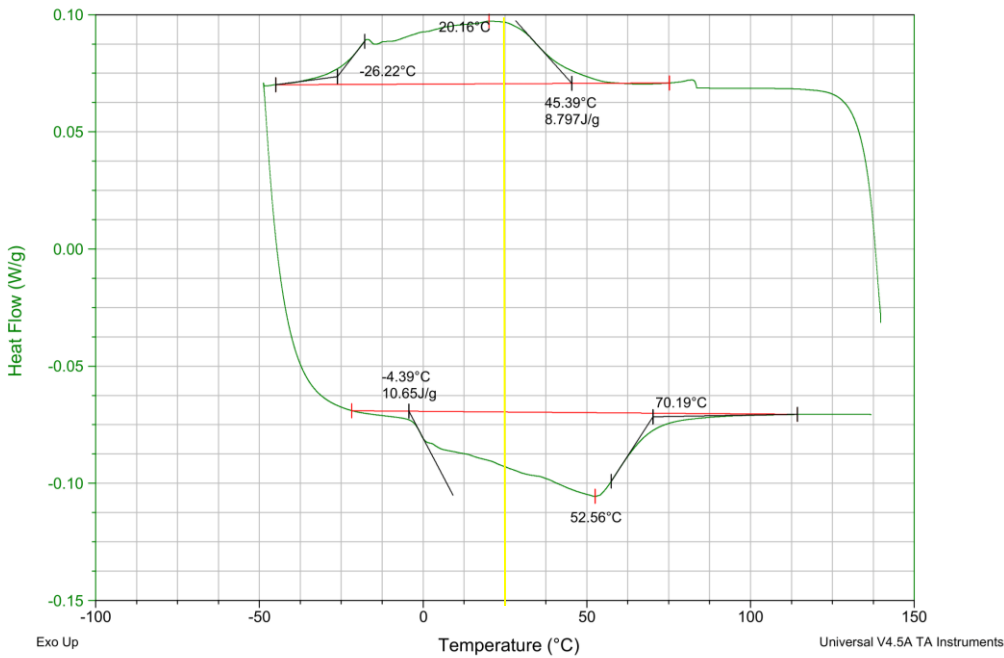


Figura 8. DSC da amostra bruta de fusão da liga policristalina Ni54Mn21Ga25.
(Autoria própria, 2023)

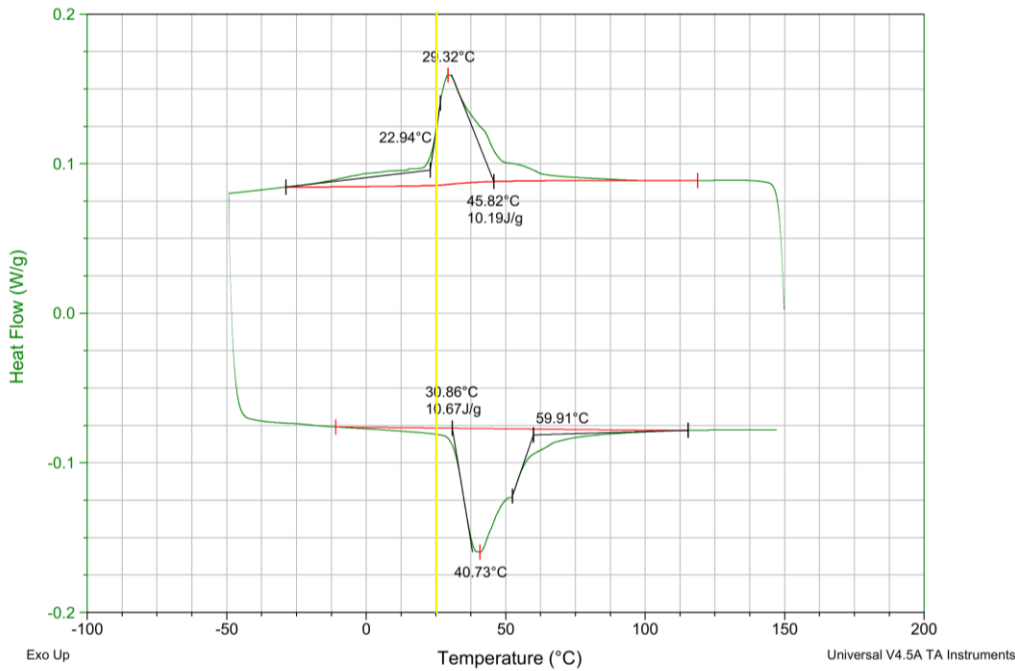


Figura 9. DSC da amostra recozida a 1000 °C por 6 horas da liga policristalina Ni54Mn21Ga25.
(Autoria própria, 2023)

Tabela 2 - Temperaturas das transformações de fase da composição Ni54Mn21Ga25 das amostras bruta de fusão e recozida.

(Autoria própria, 2023)

Amostra	Recozimento	Entalpia de Transformação (J/g)		Temperatura de transformação (°C)			
		Aquecimento	Resfriamento	Mf (°C)	Ms (°C)	As (°C)	Af (°C)
M0	-	10,65	8,79	-26,22	45,39	-4,39	70,19

M1	1000 °C / 6 horas	10,67	10,19	22,94	45,82	30,86	59,91
----	-------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Em ambas análises das curvas das amostras M0 e M foi observado um pico exotérmico na curva DSC proveniente da transformação martensítica termoelástica, sendo determinadas as temperaturas martensítica inicial Ms e final Mf. Inversamente, durante o aquecimento, foi observado um pico endotérmico e também foram determinadas a temperatura inicial As e a temperatura final Af da transformação austenítica.

No que se refere a análise da curva da amostra no estado bruto de fusão percebe-se picos menos intensos quando comparado com os picos mostrados na curva da amostra recozida, refletindo nos valores de entalpia de transformação. Este efeito de estabilizar as temperaturas de transformação de fase, ou seja, picos mais definidos nas curvas do DSC, é compatível com os dados reportados na literatura para variadas composições da família Ni-Mn-Ga, de acordo com (Tekgül e Şarlal, 2018) isso ocorre devido a homogeneidade da liga aumentar e os arranjos cristalográficos mudarem devido ao tempo de recozimento.

Verifica-se que as temperaturas da fase martensítica e austenítica apresentaram deslocamento conforme apresenta o gráfico da Figura 9.

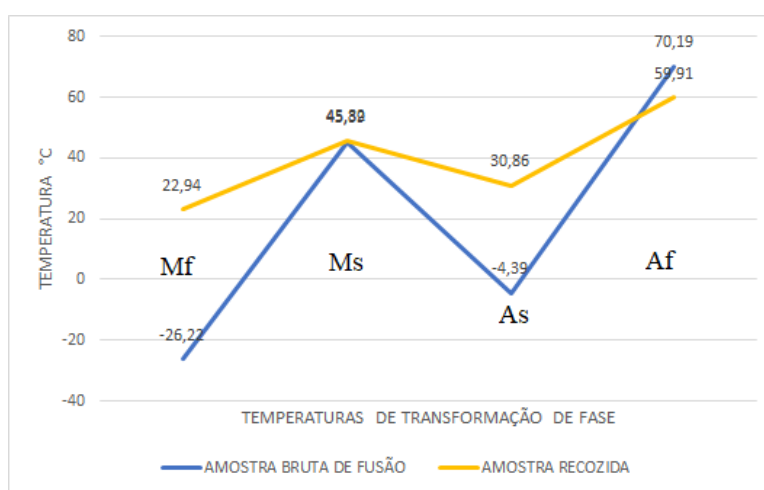


Figura 10. Variação das temperaturas de transformação de fase da amostra recozida e bruta de fusão.
 (Autoria própria, 2023)

Percebe-se que as temperaturas da amostra recozida mostram-se mais próximas, evidenciando a estabilização de cada fase. Esses resultados corroboram com os estudos reportados por (Pasquale *et al.*, 2001) e (Pushin *et al.*, 2017).

Considerando a temperatura ambiente igual a 25 °C (ver linha amarela em ambas as curvas DSC apresentadas neste texto) percebe-se que na curva do DSC para a liga bruta de fusão há a presença das duas fases: martensítica e austenítica. Com a estabilização das temperaturas pelo recozimento observa-se apenas a fase martensítica em temperatura ambiente. Estabilizar a fase martensítica em temperatura é um dos principais objetivos nas aplicações de ligas Ni-Mn-Ga como atuadores acionados por campo magnético.

5. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa obteve-se a produção de ligas policristalinas com composição química $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$ por fundição por indução, a análise dos resultados obtidos pelas curvas do DSC possibilitaram concluir que:

- Após o recozimento, uma melhoria nas propriedades de transformação de fase é obtida, e o intervalo de transformação torna-se estreito, conforme representado pela nitidez dos picos calorimétricos.
- O recozimento realizado à temperatura de 1000 °C por seis horas foi suficiente para estabilizar a fase martensítica em temperatura ambiente.
- A metodologia utilizada para produção de ligas policristalinas com memória de forma magnética foi satisfatória.

6. REFERÊNCIAS

ATAKAN TEKĞÜL, KAĞAN ŞARLAR, İ. K. Ç ÜK. Changes in structural , magnetic and magnetocaloric properties due to homogenization annealing in. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018.
 CHERNENKO, V. A. et al. Thermal and Magnetic Properties of Stress-Induced Martensites in Ni-Mn-Ga Alloys. *Le Journal de Physique IV*, v. 05, n. C2, p. C2-95-C2-98, 1995a.

- CHERNENKO, V. A. et al. The development of new ferromagnetic shape memory alloys in Ni-Mn-Ga system. *Scripta Metallurgica et Materiala*, v. 33, n. 8, p. 1239–1244, 1995b.
- CHERNENKO, V. A.; KOKORIN, V. V.; VITENKO, I. N. Properties of ribbon made from shape memory alloy Ni₂MnGa by quenching from the liquid state. *Smart Materials and Structures*, v. 3, n. 1, p. 80–82, 1994.
- CHIAVERINI, V. - *Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento - Volume II*, 1986.
- DAL, S.; DEMIREL, B.; ESKIL, M. The effects of homogenization time on the crystal structure and hardness of NiMnGaMo alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, n. xxxx, 2020.
- GABDULLIN, N.; KHAN, S. H. Effects of Varying Permeability of Magnetic Shape Memory (MSM) Alloys on Design and Performance of Actuators. *Compumag*, n. October, p. 1–3, 2015.
- GAO, P. et al. Microstructure, phase transformation and mechanical property of porous NiMnGa alloys prepared by one-step sintering. *Materials Science and Engineering A*, v. 788, n. December 2019, 2020.
- GAO, Z. Y. et al. Effect of annealing and thermal cycling on phase transformation behaviour of Ni - Mn - Ga alloy. *Materials Science and Technology*, v. 19, n. 6, p. 691–694, 2003.
- KRÁL, D. et al. Magnetic and Magneto-Optical Properties of Fe₇₅-xMn₂₅Ga_x Heusler-like Compounds. *Materials*, v. 13, n. 3, p. 1–12, 2020.
- KUMAR, A. S.; RAMUDU, M.; SESHUBAI, V. The role of quenched-in disorder in polycrystalline bulk and melt-spun ribbons of Ni₅₀Mn₂₉Ga₂₁. *Phase Transitions*, v. 94, n. 3–4, p. 183–191, 2021.
- LAITINEN, V. et al. Characterization of as-built and heat-treated Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy manufactured via laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, v. 39, p. 101854, 2021.
- LI, Z. et al. Crossing twin of Ni–Mn–Ga 7M martensite induced by thermo-mechanical treatment. *Acta Materialia*, v. 185, p. 28–37, 2020a.
- LI, Z. et al. Over 2% magnetic-field-induced strain in a polycrystalline Ni₅₀Mn_{28.5}Ga_{21.5} alloy prepared by directional solidification. *Materials Science and Engineering A*, v. 780, n. February, p. 139170, 2020b.
- LIAO, X. et al. Influence of annealing on the damping behavior of Ni-Cu-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys. *Materials*, v. 13, n. 2, 2020.
- MATTH, Johnson. Measuring Transformation Temperatures in Nitinol Alloys. 15 Out. 2022 <<http://jmmedical.com/resources/211/MeasuringTransformation-Temperatures-in-Nitinol-Alloys.html>>.
- M. ACET, L. MAÑOSA, A. P. Magnetic-Field-Induced Effects in Martensitic Heusler-Based Magnetic Shape Memory Alloys. In: *The Handbook series Magnetic Materials*. [s.l: s.n.]. v. 19p. 10–14.
- MAJI, C. Properties of magnetic shape memory alloys in martensitic phase. *Current Science*, v. 112, n. 7, p. 1390–1401, 2017a.
- MAJI, C. Properties of magnetic shape memory alloys in martensitic phase. v. 112, n. 7, 2017b.
- PASQUALE, M. et al. Effect of texturing on the magnetically activated properties of polycrystalline NiMnGa alloys. *EDP Sciences*, v. 11, p. 305–309, 2001.
- PUSHIN, V. G. et al. Magnetically Controlled Thermoelastic Martensite Transformations and Properties of a Fine-Grained Ni 54 Mn 21 Ga 25 Alloy. *MAGNETISM*, v. 59, n. 7, p. 1321–1331, 2017.
- TEKGÜL, A.; ŞARLAR, K.; KÜÇÜK, İ. Structural, magnetic and magnetocaloric properties of Ni 54Mn 14Ga 27Fe 5 : the impact of annealing time. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, n. 0123456789, p. 1–6, 2020.
- TOMAN, J.; MÜLLNER, P.; CHMIELUS, M. Properties of as-deposited and heat-treated Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy processed by directed energy deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 752, p. 455–463, 2018.
- ULLAKKO, K. et al. Large magnetic-field-induced strains in Ni₂MnGa single crystals. *Applied Physics Letters*, v. 69, n. 13, p. 1966–1968, 1996.
- ULLAKKO, K. et al. MAGNETIC-FIELD-INDUCED STRAINS IN POLYCRYSTALLINE Ni-Mn-Ga AT ROOM TEMPERATURE. *Scripta materialia*, v. 44, p. 475–480, 2001.
- VILLA, F. et al. Physical Characterization of Sintered NiMnGa Ferromagnetic Shape Memory Alloy. *Material*, 2020.
- ZHANG, Y. C. et al. Structure, magnetic and magnetocaloric properties of Ni₂MnGa Heusler alloy nanowires. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 513, n. April, p. 167100, 2020.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

EFFECT OF ANNEALING ON PHASE TRANSFORMATION TEMPERATURES IN ALLOY $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$

Kaline Ventura Batista
Júlyana Maria de Medeiros Quirino
Universidade Federal da Paraíba,
kalineufcg@gmail.com; julyanaquirino@yahoo.com.br

Francisco Riccelly Pereira Feitosa
Universidade Federal do Piauí
riccellypfeitosa@gmail.com

Cícero da Rocha Souto
Universidade Federal da Paraíba
cicerosouto@cear.ufpb.br

Abstract. In recent years, ferromagnetic alloys of the Ni–Mn–Ga family have been extensively studied by several research groups due to their magnetic shape memory property, that is, these alloys present considerable deformation when exposed to a magnetic field. Magnetic shape memory alloy (MSMA) holds high potential as an emerging class of smart materials that can function as both actuators and sensors for a new generation of simple, fast digital components that produce high mechanical performance in a limited space making it possible to obtain light and compact miniaturized actuators combined with cost reduction. For the design and modeling of magnetic field driven systems, it is necessary to define the chemical composition, the production process as well as the heat treatment parameters, since these are the main factors that directly influence not only the transformation temperatures but also the magnetic properties. This context motivated the development of this research, which aimed to analyze the effect of annealing heat treatment on phase transformation temperatures in polycrystalline alloys of the Ni–Mn–Ga family. The methodology adopted consisted of manufacturing polycrystalline magnetic alloys with an initial nominal composition of $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$ via induction casting, then annealing at 1000 °C for 6 hours in a controlled environment with an argon atmosphere. The thermomechanical characterization of the material was determined using the differential scanning calorimetry analysis test to determine the phase transformation temperatures. By comparing the results obtained from the samples in the raw melting and annealed state, it could be observed that there was an accentuation of the peaks that indicate phase transformation of the alloy, as well as a change in the variation of the initial and final temperatures of the martensitic and austenitic phases. It was possible to conclude that the parameters adopted in the annealing treatment enabled the stabilization of the martensitic phase at room temperature.

Keywords: Heusler alloys; magnetic shape memory alloy; Ni–Mn–Ga.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.