

EFEITO DO DIÂMETRO DE FIOS NiTi EM REGIME SUPERELÁSTICO SUBMETIDO A SHAPE-SETTING NAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE

Felipe Silva Lima, felipe05silva06@gmail.com¹

Alysson Domingos Silvestre, silvestredomingos01@gmail.com¹

Ícaro Carvalho Dourado, icaro.carvalho@estudante.ufcg.edu.br²

Andersson Guimarães Oliveira, anderssonoliveira@gmail.com³

Cícero da Rocha Souto, cicerosouto@cear.ufpb.br⁴

¹Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Cidade Universitária, SN, João Pessoa – PB, 58051-900

²Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Departamento de Engenharia Mecânica, R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58428-830

³Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Centro de Ciências Agrárias, BR-104, Rio Largo - AL, 57100-000

⁴Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Departamento de Engenharia Elétrica, Cidade Universitária, SN, João Pessoa – PB, 58051-900

Resumo: As ligas com memória de forma fazem parte de uma classe de materiais inteligentes com grande potencial de aplicações em diversos tipos de sistemas de engenharia, além de problemas interdisciplinares. Essas ligas exibem duas propriedades fundamentais: o efeito memória de forma e a superelasticidade. Estas propriedades são advindas de uma transformação de fase em estado sólido do tipo austenita/martensita em consequência da variação de temperatura (efeito memória de forma) ou aplicação de tensão (efeito superelástico). As temperaturas nas quais ocorrem estas transformações de fase são condições de contorno em aplicações as quais o material se destina, dispondo de propriedades distintas em cada fase. As ligas a base de NiTi são as mais empregadas por combinar as melhores propriedades associadas às ligas com memória de forma com boas propriedades mecânicas. Considerando essas questões, o objetivo deste trabalho é investigar a mudança das temperaturas de transformação de fase conforme variação do diâmetro de fios de NiTi em regime superelástico após shape-setting (técnica para obtenção da geometria final do dispositivo sob tratamento térmico). O estudo foi realizado em fios de cinco calibres distintos, submetidos à tratamento térmico em um forno-mufla pré-aquecido a 500°C por 30 minutos, em atmosfera controlada. Foram realizadas análises térmicas para identificação das temperaturas de transformação de fase pela técnica de Differential Scanning Calorimetry (DSC). Os resultados obtidos por meio dos ensaios de DSC permitiram verificar que as temperaturas de transformação de fase de cada amostra ensaiada não apresentaram uma tendência linear de aumento com elevação do diâmetro. Observa-se, contudo, que a influência do diâmetro sob as temperaturas de transformação de fase não dispensa a adequada escolha do tratamento térmico e planejamento experimental, fatores que combinados abrem um leque de possibilidades para especificação de dispositivos que empregam esse tipo de liga.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Temperatura de transformação de fase, Diâmetro de fio, DSC

1. INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMF) compõem uma categoria de material inteligente, assim como os materiais piezoelétricos, os fluidos magnetoreológicos e eletroreológicos, entre outros. Elas são materiais metálicos capazes de recuperar as suas formas prévias depois de deformadas, isto é, “lembram” de seu formato inicial quando submetida às variações de campos termomecânicos ou magnéticos (Duerig, Melton, & Stöckel, 2013; Lagoudas, 2008; Otsuka & Wayman, 1999).

As extraordinárias propriedades do material são causadas por transformações ocorridas em sua estrutura cristalina. Essas transformações são processos não-difusivos envolvendo fases sólidas que ocorrem a velocidades muito elevadas. Durante estas transformações, as LMF podem existir em duas fases distintas, austenítica e martensítica. A fase de maior temperatura é chamada austenita (A) e possui, geralmente, estrutura cúbica. A fase de menor temperatura, denominada martensita (M), pode apresentar estrutura ortorrômbica, tetragonal ou monoclinica. Os cristais que integram a fase martensítica podem estar organizados de modo a possuírem orientações distintas entre si, caracterizando a martensita maclada (twinned), ou terem uma direção preferencial de orientação, assinalando a martensita demaclada (detwinned).

Os dois principais efeitos explorados, ocasionado por diferentes fases presentes nos materiais com memória de forma são a Superelasticidade (SE) e o Efeito Memória de Forma (EMF), propriamente dito. De forma resumida, a SE ocorre quando o material recuperar toda a deformação imposta sobre ele, acompanhado de um laço de histerese em um ciclo de carregamento-descarregamento, enquanto que o EMF se dá quando a liga é submetida a um carregamento em baixas temperaturas, sendo capaz de recuperar a sua forma original quando aquecidas. A Fig. 1 esquematiza estas transformações.

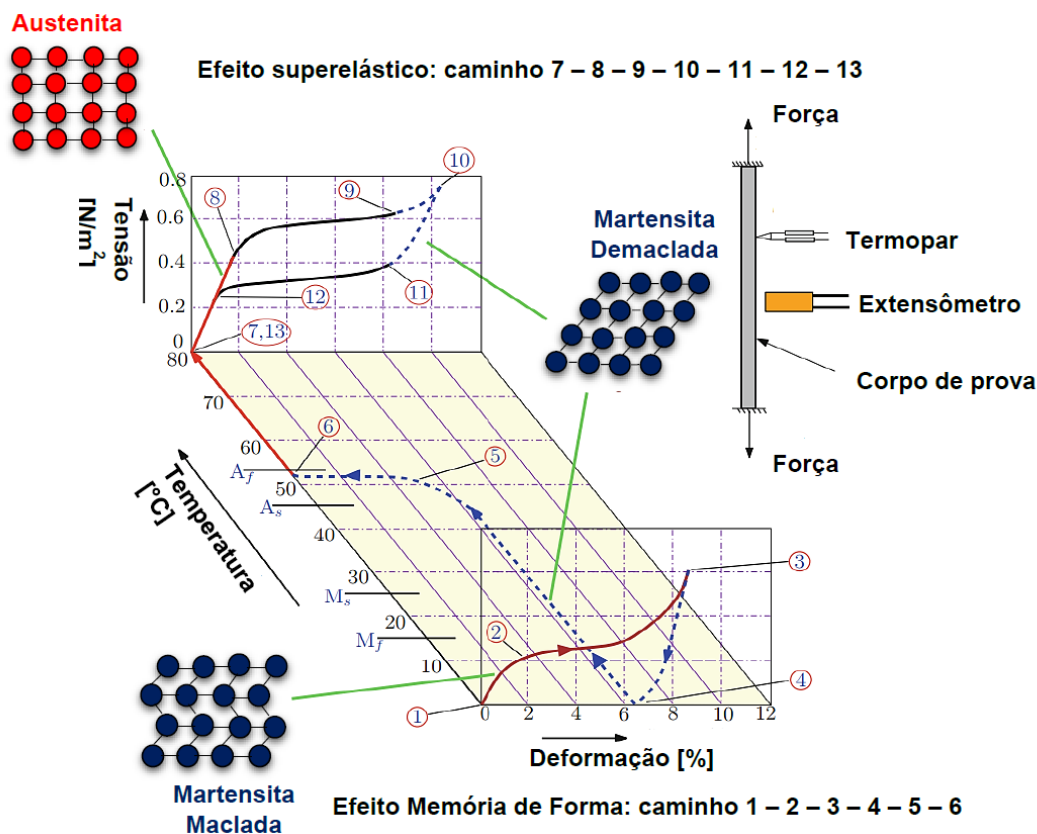


Figura 1. Um esquema da curva de tensão-deformação demonstrando as propriedades EMF e SE. Fonte: Adaptado de Rao, Srinivasa e Reddy (2015)

Uma grande variedade de materiais pode proporcionar esses efeitos, entretanto, o maior desafio em relação à aplicação de LMF é descobrir e aproveitar todas as suas vantagens. A liga NiTi, também denominada de Nitinol, já vem sendo empregada há algum tempo devido a boa resistência mecânica, excelente ductilidade e boa resistência à corrosão, em adição ao excelente EMF, porém apenas recentemente alguns engenheiros usufruem do seu verdadeiro potencial. Em face a isso, as LMF de NiTi vêm sendo vastamente utilizadas na qualidade de atuadores, microcontroladores e sensores, em domínios como biomédico, automobilístico, aeroespacial, etc.

Nesta perspectiva, a fim de melhorar as propriedades funcionais para aplicações, além das restrições comerciais e custo de componente, inúmeros esforços envolvendo diferentes tipos de processamento vem sendo galgados, já que fatores como composição química, tratamentos térmicos e/ou mecânicos terem que ser rigorosamente controlados, uma vez que qualquer modificação causa comportamentos indesejáveis nas LMF à base de NiTi.

No que concerne a investigação dos efeitos de diferentes variáveis ligadas ao processamento termomecânico de LMF NiTi, a produção científica ampliou-se ininterruptamente no decurso dos anos. Em Motemani, et al. (2009), por exemplo, observaram uma liga de NiTi rica em Ni, preparada por fusão a vácuo e resfriadas em três meios foi avaliada via DSC e difração de raios X, medição de dureza e teste de tração para investigar o efeito da taxa de resfriamento na temperatura de transformação e nas propriedades mecânicas. Mais tarde, outros elementos ganharam notoriedade Asl, Kadkhodaei, Karimzadeh (2019) e Heidari et al. (2016) estudaram molas helicoidais LMF produzidas a partir da configuração de dois tipos de fios: um com EMF e outro SE à temperatura ambiente, no qual parâmetros de processamento, incluindo trabalho a frio, temperatura e duração do tratamento térmico e taxa de resfriamento, foram investigadas nas temperaturas de transformação dos produtos.

Desta maneira, o objetivo principal deste trabalho é avaliar as mudanças nas temperaturas de transformação de fase conforme variação de diâmetros em fios NiTi apresentando superelasticidade na temperatura ambiente, após o processo *shape-setting*, por meio de análises de calorimetria diferencial de varredura (DSC). Convém ressaltar, que o *shape-setting* corresponde a fixação na disposição geométrica desejada e o tratamento térmico posterior, sendo um dos principais

métodos para fabricação de molas LMF, por conseguinte este estudo visa subsidiar diretrizes ao projetista na concepção de atuadores em Nitinol.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Na análise térmica existem algumas técnicas apropriadas a identificar a influência da temperatura sobre as propriedades de um sistema. A Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) é uma das técnicas mais empregadas, dado que indica com certa precisão as temperaturas de transformação de fases que ocorrem nas ligas de NiTi.

A técnica analítica de DSC considera a diferença no fluxo de calor entre o material de estudo (amostra) e um padrão de referência em função da temperatura, com programação de temperatura controlada. A partir desta análise é arregimentado um gráfico de fluxo de calor versus temperatura. De acordo com o caráter dos processos envolvidos (endotérmicos ou exotérmicos), a curva DSC pode acomodar picos positivos ou negativos.

As variações de temperatura estão associadas a eventos que retratam transições térmicas. Nessa análise podem ser detectados eventos térmicos de primeira ordem como fusão, cristalização, decomposição, reticulação ou cura; e eventos térmicos de segunda ordem como transição vítrea, transições conformacionais, transições indicativas de formas polimórficas e calor específico e de reação. Assim é possível determinar quantitativamente capacidade calorífica, temperatura e entalpia de transição. A Fig. 2 mostra o esquema ilustrativo de um sistema para medida de DSC.

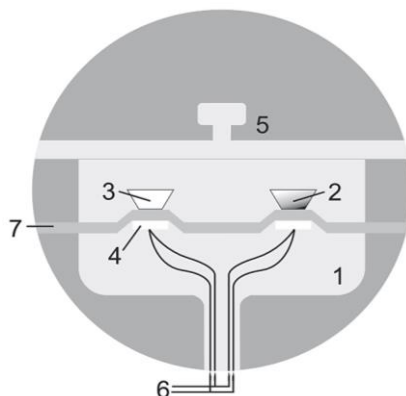


Figura 2. Esquema da célula calorimétrica do DSC. 1) Cilindro de prata; 2) amostra teste; 3) amostra referência; 4) disco de cromo; 5) tampa; 6) termopares; 7) disco termoeletrico. Fonte: Gasperini (2005)

2.1.1. Equipamento

Os equipamentos de DSC são classificados de acordo com a disposição da fonte de aquecimento, como:

- DSC por compensação de potência (*power-compensation*);
- DSC por fluxo de calor (*heat-flux*).

Em um sistema DSC por compensação de potência a amostra e a referência são aquecidos individualmente e a diferença na potência elétrica, necessária para manter as temperaturas da amostra e da referência aproximadamente iguais, é mensurada. A diferença entre a amostra e a referência pode ser medida através da quantidade de energia elétrica necessária para manter o ΔT entre as mesmas, igual a zero. O DSC por compensação de potência dispõe para monitoramento de sensores de temperatura, resistências termométricas de platina, ligadas a uma ponte wheatstone. Alterações relevantes no ambiente podem influenciar nos resultados.

O calorímetro DSC por fluxo de calor emprega um único forno, especificamente, a amostra e a referência são dispostas simetricamente e aquecidos. O fluxo de calor envolvido no processo é proporcional à variação de temperatura entre a amostra e referência. A aquisição de dados ocorre por meio do posicionamento dos cadinhos sobre uma base de metal altamente condutora, geralmente platina ou Constantan (liga de Cobre e Níquel). Cada amostra possui um sensor de temperatura que permite o acompanhamento da variação da temperatura. Os termopares estão ligados à base onde se localizam a amostra e a referência e medem a diferença de temperatura que é convertida em fluxo de calor usando o equivalente térmico da lei de Ohm, conforme Eq. 1:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta T}{R_D} \quad (1)$$

Onde: dQ/dt = Fluxo de calor;

ΔT = Diferença de temperatura entre amostra e referência;

R_D = Resistência térmica do disco termoeletrico.

2.1.2. Parâmetros

Da mesma maneira que outras análises térmicas, a quantidade de amostra necessária para os experimentos é estreita, frequentemente utiliza-se de 1-10 mg de amostra. O uso de pequenas quantidades de massa possibilita uma maior distribuição do calor no material a ser examinado, assim como a existência de picos mais definidos e uma menor energia requerida para que ocorra o processo.

O gradiente de temperatura aplicado no experimento irá depender das propriedades do material analisado, tal como a capacidade do equipamento empregado. Todavia, recomenda-se que os experimentos sejam guiados com temperatura inicial inferior a temperatura do primeiro processo de transformação, e a temperatura final superior a temperatura vinculada no último processo, porém não deve ser muito alta demais para não degradar a amostra.

Comumente são utilizadas taxas de aquecimento/resfriamento de 10 e 20 °C min⁻¹. Taxas altas podem não ser capazes de identificar a sucessão de alguns fenômenos e ainda influenciar o resultado térmico.

Nesta perspectiva, a Fig. 3 representa um termograma de DSC de uma liga de NiTi, no qual o material foi aquecido e arrefecido na faixa de temperatura compreendida entre -70 a 100°C. No aquecimento, a baixas temperaturas, o material situa-se na fase martensítica (M). O pico encontra-se aproximadamente a 50°C, e corresponde a uma transição de natureza endotérmica para a fase austenítica (A). A área abaixo deste pico representa o calor latente de transformação. As linhas tracejadas evidenciam os valores de início (A_s) e fim (A_f) da transformação. Para temperaturas entre estes valores as duas fases coexistem no material (SHAW, 2008). Na curva inferior da Fig. 3, o material foi resfriado a partir de 100 a -70°C. A transformação inicia com a fase austenítica e finaliza na fase martensítica, dispondo também da fase intermediária R. Ambas as transições são de natureza exotérmica. As fases austenita e martensita são as responsáveis pelo comportamento não usual do material (SHAW, 2008).

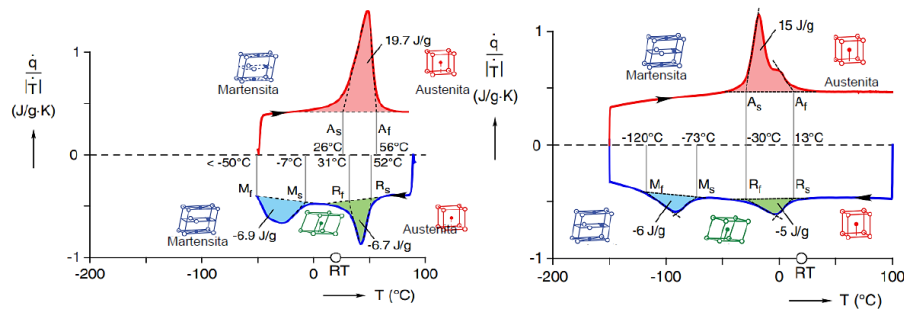


Figura 3. Curva esquemática típica do resultado de DSC de uma liga NiTi: (a) fio EMF e (b) fio SE. Fonte: Shaw (2008)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Conformação termomecânica e tratamento térmico

Para obtenção das molas utilizou-se fios de NiTi com 0,5, 0,7, 0,9, 1,2 e 1,5 mm de diâmetro, adquiridos por intermédio da empresa SANDINOX Biomateriais, no estado como recebido, composição química nominal de 56Ni-44Ti (at.%Ti), segundo informado pelo fornecedor. Os fios foram conformados plasticamente ao redor de uma barra roscada com diâmetro, passo e hélices, próximos ao da mola preconizada. Depois, este sistema (barra roscada + fio de NiTi) foi submetido a tratamentos térmicos, com a finalidade de adquirir formato de mola e apresentar as propriedades funcionais inerentes a uma LMF. O tratamento térmico foi executado em um forno a resistência elétrica do tipo mufla, pré-aquecido a uma temperatura de 500 °C, durante 30 minutos. Logo após, os elementos resultantes foram resfriados sob convecção natural. Estas etapas citadas para a fabricação de molas LMF, frequentemente, são denominadas de *shape-setting*.

3.2. Análise Térmica: Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Os procedimentos de DSC foram executados empregando um calorímetro modelo Q20 do fabricante *TA Instruments*, equipado com cadinho de alumínio e um segundo porta amostra de alumínio vazio usado como referência na célula de ensaio. Os parâmetros retirados do DSC para estudo das LMF são as temperaturas e as energias de transformação (através da integração dos picos de transformação), além da histerese térmica a partir das diferenças entre as temperaturas de pico A_p e M_p.

Para esta análise foram preparados corpos de prova (CP) obtidos por meio de corte mecânico da extremidade da mola e do fio conforme recebido pelo fabricante. Após o corte, os CP foram banhados com álcool etílico e sua limpeza final foi feita acondicionando-os em um recipiente, que por sua vez, foi imerso em água no equipamento de ultrassom por 10 minutos, para evitar contaminação.

Os ensaios foram empreendidos em uma atmosfera inerte com o fluxo de 50 ml/min de Nitrogênio. Foi utilizado um intervalo de temperatura de $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a uma taxa de aquecimento e arrefecimento de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. As amostras utilizadas detinham 3 mm de comprimento. As instruções de programação do ensaio DSC são indicadas na Fig.4, no qual não se evidencia os tempos de patamar estabelecidos em 1 minuto.

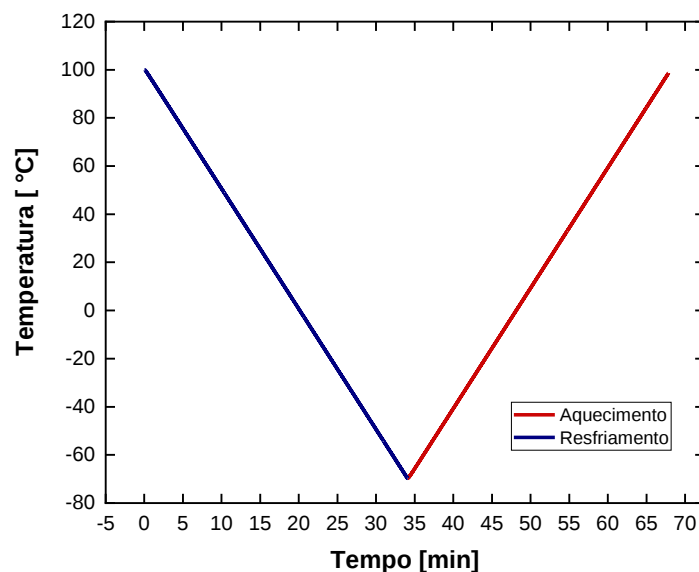


Figura 4. Histórico de temperatura no ensaio do DSC. Fonte: Acervo do autor (2021)

Os dados foram obtidos pelo programa no formato txt, em seguida importados para o Excel e plotado pelo programa *Origin* 2018. As temperaturas de transformação de fase foram obtidas por meio do software, de acordo com a norma técnica ASTM F 2004-05, *Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel- Titanium Alloys by Thermal Analysis*, pela intersecção da linha base com a extensão da reta de maior inclinação do pico da curva. A partir das curvas de DSC obtidas foi possível determinar as temperaturas críticas de transformação de fase para o material conforme recebido e após os tratamentos térmico de *shape-setting*. A Fig. 5 mostra o tipo de DSC utilizado para as análises térmicas.

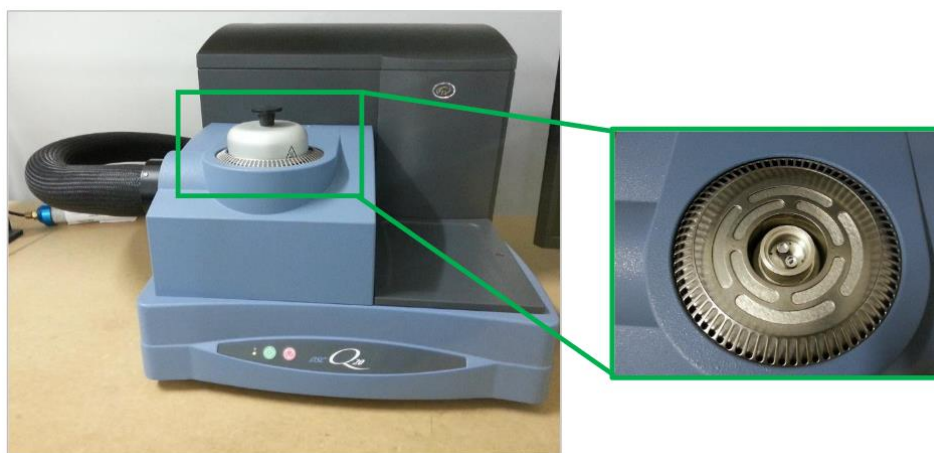
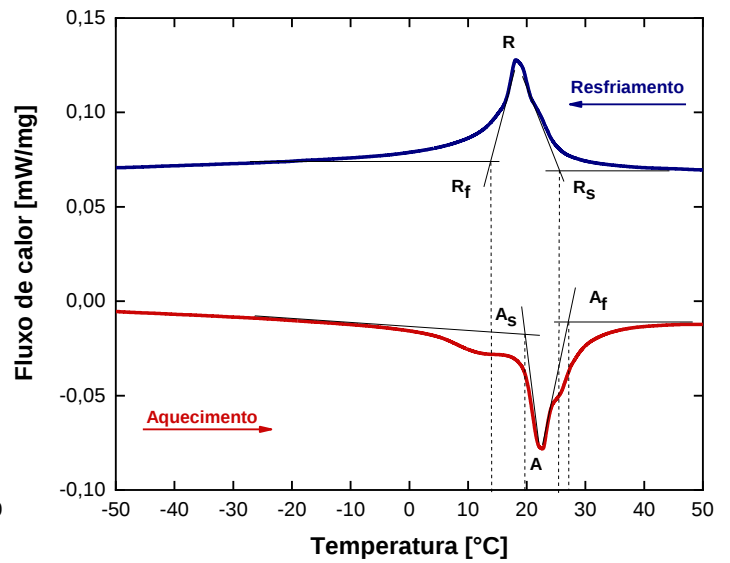
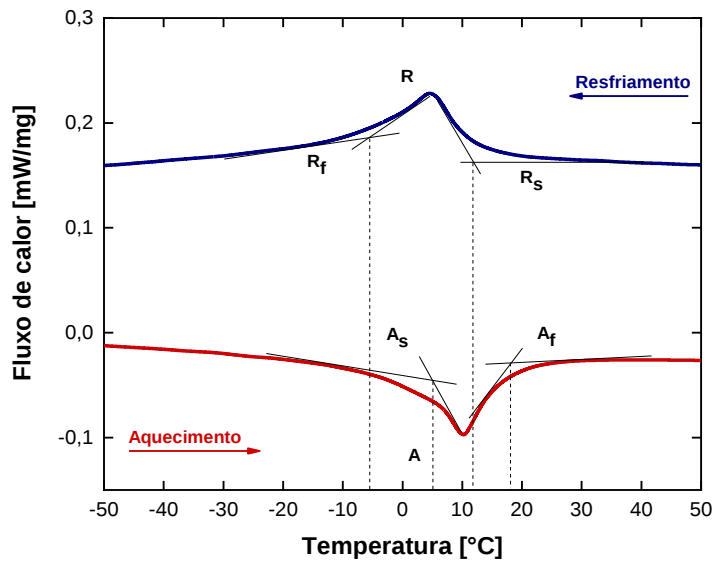


Figura 5. Calorímetro DSC modelo Q20 da TA Instruments, com detalhe do interior. Fonte: Acervo do autor (2021)

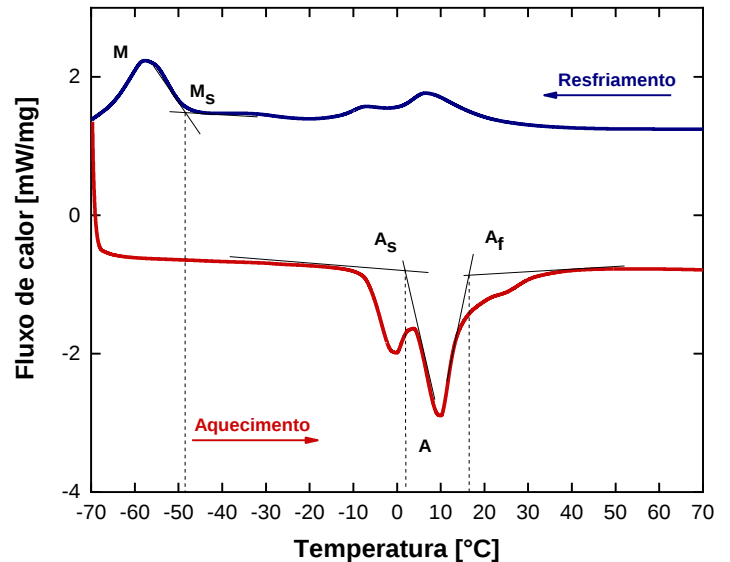
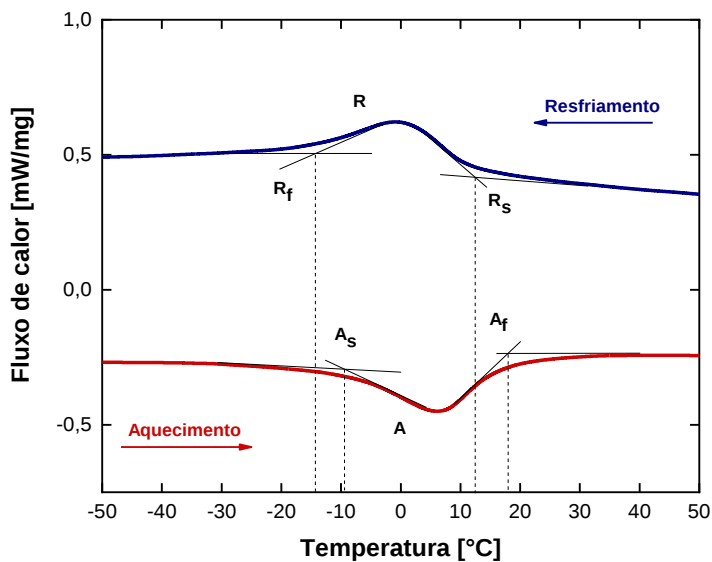
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 apresenta as curvas de calorimetria para os CP NiTi no estado como recebidas, e para CP recozidos a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 minutos. As medições de DSC revelam que ao longo do aquecimento e resfriamento são observadas regiões onde ocorrem picos no fluxo de calor fornecido pelo equipamento, que configuram as temperaturas críticas de transformação de fase.

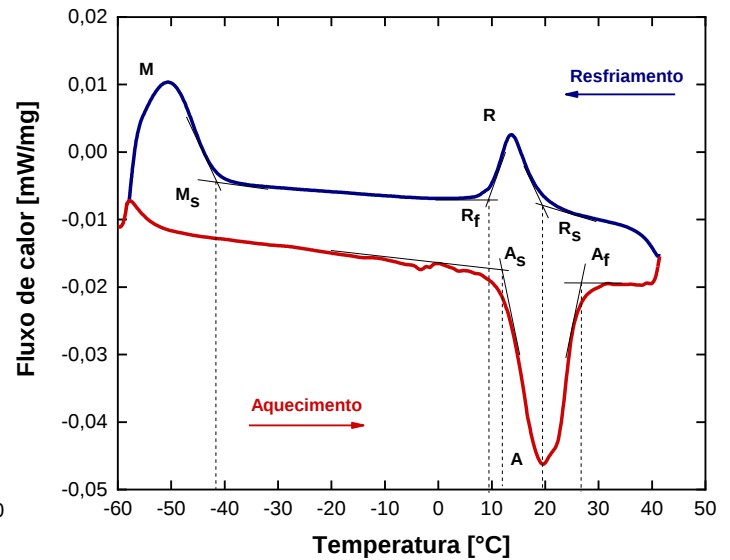
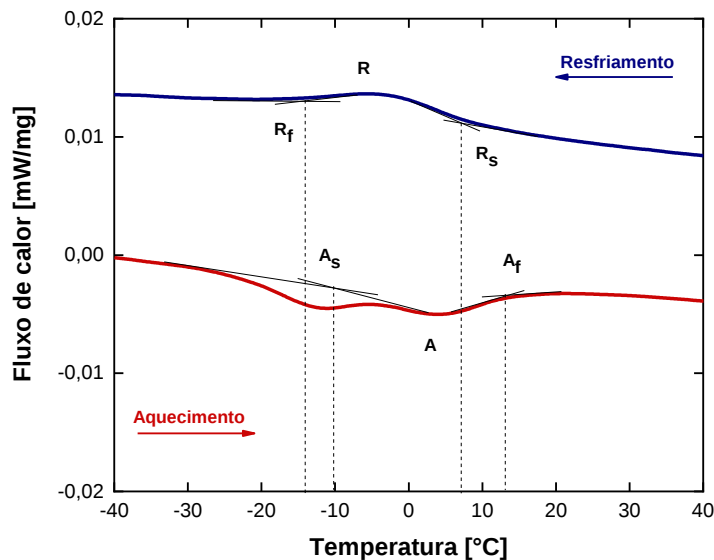
Diâmetro de 0,5 mm



Diâmetro de 0,7 mm



Diâmetro de 0,9 mm



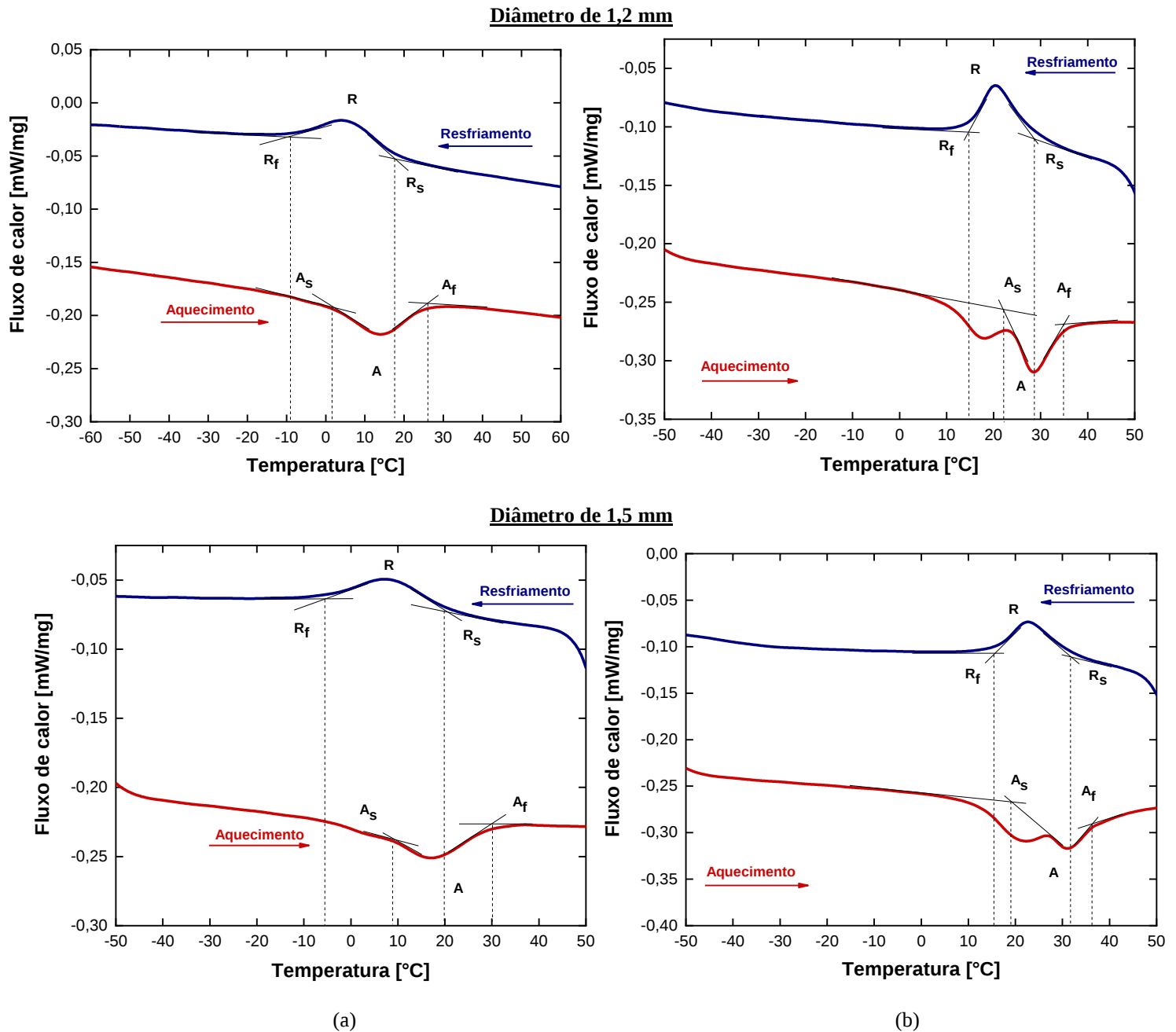


Figura 6. Termogramas DSC das amostras LMF NiTi: (a) conforme recebidos; (b) após tratamento térmico.
Fonte: Acervo do autor (2021)

Observa-se a existência nas amostras em apreço de regiões características de transformação martensítica direta (resfriamento) e reversa (aquecimento). Além disso, comparando as temperaturas de transformação de fase indicadas percebe-se diferenças significativas entre os CP tratados e não tratados, evidenciando que o tratamento térmico de recozimento a 500 °C tende a deslocar a curva para a direita promovendo temperaturas de transformação de fase excepcionalmente mais elevada dos exemplares. Essa variação está muito provavelmente ligada ao decréscimo da densidade de discordâncias associado ao recozimento. Acredita-se, também, que os fios de NiTi tenham sofrido deformação plástica severa durante a conformação do fio em sua geometria helicoidal e o nível de tensões residuais tenha levado a transformação martensítica para faixas de temperaturas bastante baixas, fora da faixa atingida pelo equipamento DSC usado neste trabalho (o limite inferior estabelecido -70°C).

Além das temperaturas de transformação de fase, foram obtidos os valores de histerese térmica (H_t) e as entalpias de transformação (ΔH) para todos os casos estudados. As principais propriedades térmicas estão resumidas na Tab. 1 e Tab. 2. Uma análise mais pormenorizada dos dados das tabelas revelam, entretanto, que as energias de transformação de fase e histerese térmica observadas ao longo do resfriamento foram menores do que esperado para a transformação de fase direta. Na verdade, se sucedem transformações intermediárias, ou seja, envolvem a formação da martensita conhecida

Tabela 1. Temperaturas e energias de transformação de amostras NiTi conforme recebidos pelo fabricante. Fonte: Acervo do autor (2021)

Amostra (mm)	Ms (° C)	Mf (° C)	Rs (° C)	Rf (° C)	ΔH (J/g)	As (° C)	Af (° C)	ΔH (J/g)	Ht (°C)
0,5	---	---	11,9	-5,6	14,0	5,0	18,2	14,6	5,7
0,7	---	---	-5,9	-14,2	3,1	-9,4	18,0	4,2	6,8
0,9	---	---	7,2	-14,6	2,1	-10,0	13,5	1,9	9,4
1,2	---	---	17,7	-9,8	8,5	2,2	25,9	9,1	10,3
1,5	---	---	20,6	-5,5	14,0	9,4	30,0	10,9	10,2

Tabela 2. Temperaturas e energias de transformação de amostras NiTi após *shape-setting*. Fonte: Acervo do autor (2021)

Amostra (mm)	Ms (° C)	Mf (° C)	Rs (° C)	Rf (° C)	ΔH (J/g)	As (° C)	Af (° C)	ΔH (J/g)	Ht (°C)
0,5	---	---	25,6	13,9	7,7	19,7	27,1	8,4	4,5
0,7	- 48,2	---	---	---	---	1,9	16,4	---	---
0,9	- 41,4	---	19,4	9,3	6,5	12,4	26,8	22,8	6,1
1,2	---	---	28,6	14,7	7,1	22,0	35,0	4,1	8,1
1,5	---	---	31,8	15,7	11,5	19,3	36,3	3,7	8,6

por fase R, cuja estrutura cristalina é romboédrica. Embora a história do tratamento térmico das amostras brutas seja desconhecida, a presença da fase R durante o teste DSC indica que o material fornecido foi recozido abaixo da temperatura de recristalização. Esta conclusão é baseada em estudos anteriores em materiais trefilados a frio e laminados a quente sem recozimento. Além disso a presença da fase R se torna mais perceptível quando o material com memória de forma é submetido a tratamentos térmicos e/ou termomecânicos apropriados (Lagoudas, 2008; Otsuka & Wayman, 1999). Os diâmetros dos fios utilizados para confecção dos atuadores também foi um fator ponderado no estudo. Assim, examinando esse ponto, constatou-se, primeiramente para a situação conforme recebido, que as temperaturas de transformação de fase, Rs, Rf, As e Af não seguem nenhum padrão em relação ao seu comportamento térmico quando ocorre modificação de diâmetro de fio. Na mesma análise, ao se debruçar sobre os resultados relativos aos CP tratados pode-se notar, que o comportamento randômico, se mantém com o aparecimento da fase martensítica nos CP com 0,9 e 0,7 mm, inclusive este último espécime não apresentou picos definidos de fase R. Este comportamento pouco convencional pode estar relacionado com a heterogeneidade composicional criada na matriz B2 e pela presença do precipitado Ni₄Ti₃, de cada fio. O surgimento de dois picos sobrepostos pode indicar heterogeneidade da composição química e na região central à formação de precipitados, como Ti₄Ni₂O, sendo uma região rica em níquel. Logo abaixo, estão apresentados os gráficos de DSC da liga NiTi com o comportamento das temperaturas críticas conforme recebido e tratada termicamente (Figura 7).

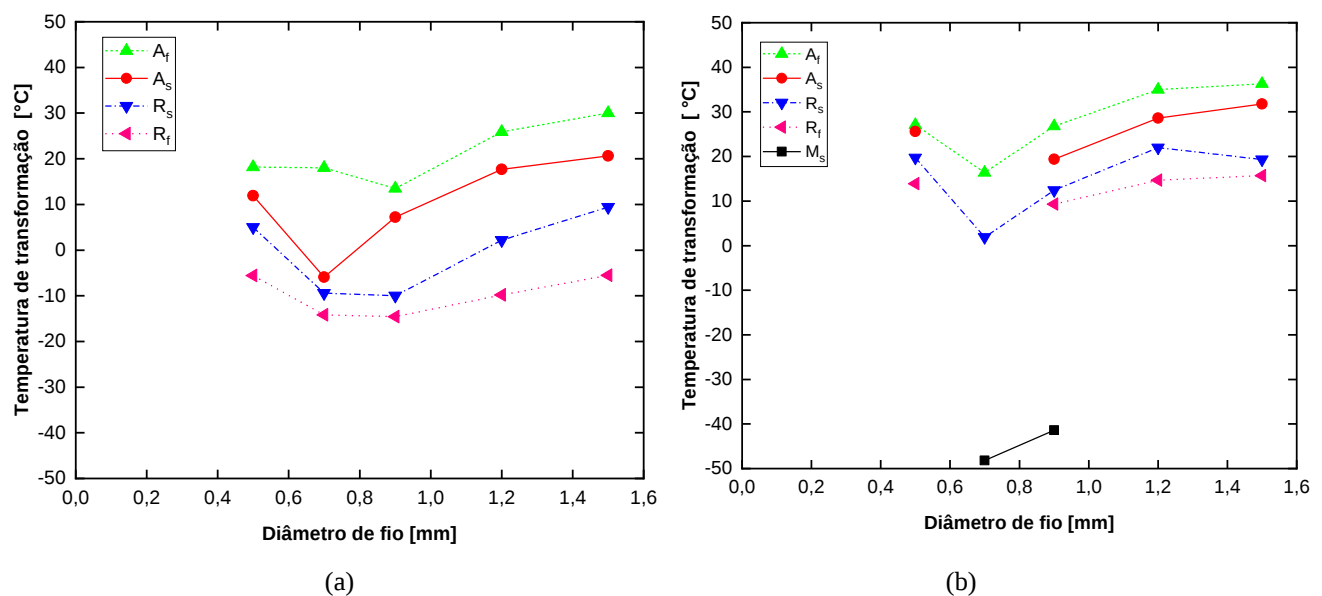


Figura 7. Comparativo entre as temperaturas de transformação entre as amostras: (a) conforme recebidos; (b) após tratamento térmico. Fonte: Acervo do autor (2021)

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados para a liga de NiTi em estudo e discussão realizada:

- A caracterização térmica via DSC, dos fios adquiridos comercialmente permitiram identificar que todos exibiram à temperatura ambiente a fase austenítica como fase principal e temperaturas A_f compatíveis com o comportamento superelástico na condição “como recebido”, acrescido a isso também havia transformações de fase envolvendo a fase R na faixa de temperatura testada, em função dos baixos valores de entalpia de transformação e histerese de térmica;
- Os termogramas DSC dos fios após a conformação e o tratamento térmico (*shape-setting*) evidenciaram que o processo de fabricação utilizado influenciava diretamente na modificação das temperaturas de transformação de fase devido à presença de tensões internas. Ademais a elevação do diâmetro de fio não revelou uma tendência de aumento nas temperaturas de fase.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem e agradecem o apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal da Paraíba – UFPB e ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas – LAMMEA/UFCG.

7. REFERÊNCIAS

- Asl, F. J., Kadkhodaei, M., & Karimzadeh, F., 2019, The effects of shape-setting on transformation temperatures of pseudoelastic shape memory alloy springs. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 4(4), 568-576.
- Duerig, T. W., Melton, K. N., & Stöckel, D. W. C. M., 2013, *Engineering aspects of shape memory alloys*. Butterworth-Heinemann.
- Duerig, T. W., & Bhattacharya, K., 2015, The influence of the R-phase on the superelastic behavior of NiTi. *Shape Memory and Superelasticity*, 1(2), 153-161.
- Gasperini, A. A. M., 2005, Estudo estrutural e térmico da liga Ni46Ti54.
- Heidari, B., Kadkhodaei, M., Barati, M., & Karimzadeh, F., 2016, Fabrication and modeling of shape memory alloy springs. *Smart Materials and Structures*, 25(12), 125003.
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A., 2014, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 56, 1078-1113.
- Lagoudas, D. C., 2008, *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer Science & Business Media.
- Motemani, Y., Nili-Ahmadabadi, M., Tan, M. J., Bornapour, M., & Rayagan, S., 2009, Effect of cooling rate on the phase transformation behavior and mechanical properties of Ni-rich NiTi shape memory alloy. *Journal of alloys and compounds*, 469(1-2), 164-168.
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (Eds.), 1999, *Shape memory materials*. Cambridge university press.
- Rao, A., Srinivasa, A. R., & Reddy, J. N., 2015, *Design of shape memory alloy (SMA) actuators* (Vol. 3). Cham: Springer International Publishing.
- Shaw, J. A., 2008, Tips and tricks for characterizing shape memory alloy wire: part 1—differential scanning calorimetry and basic phenomena.
- Villarinho, D. D. J., Roese, P. B., Ferreira, C., & Schaeffer, L., 2010, Caracterização parcial de liga Nitinol® atuador através de pontos críticos de transformação de fases utilizando calorimetria diferencial de varredura. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, 6(1), 1-10.
- Wiggers, W. D. S., 2011, Efeito do tempo de tratamento térmico de fios de NiTi conformados a frio na temperatura final de transformação austenítica.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECT OF WIRE DIAMETER UNDER SHAPE SETTING ON TRANSFORMATION TEMPERATURES OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOY WITH SUPERELASTIC BEHAVIOR

Felipe Silva Lima, felipe05silva06@gmail.com¹

Alysson Domingos Silvestre, silvestredomingos01@gmail.com¹

Ícaro Carvalho Dourado, icaro.carvalho@estudante.ufcg.edu.br²

Andersson Guimarães Oliveira, anderssonoliveira@gmail.com³
Cícero da Rocha Souto, cicerosouto@cear.ufpb.br⁴

¹Federal University of Paraíba – UFPB , Graduate Program in Mechanical Engineering, Cidade Universitaria, SN, João Pessoa – PB, 58051-900

²Federal University of Campina Grande – UFCG , Mechanical Engineering Department, R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58428-830

³Federal University of Alagoas – UFAL , Center of Agrarian Sciences, BR-104, Rio Largo - AL, 57100-000

⁴Federal University of Paraíba – UFPB , Electrical Engineering Department, Cidade Universitaria, SN, João Pessoa – PB, 58051-900

Abstract. *Shape memory alloys are part of a class of intelligent materials with great potential for applications in various fields such as engineering systems, furthermore interdisciplinary problems. These alloys exhibit two fundamental properties: shape memory effect and superelasticity. These properties result from an martensitic/austenitic solid-state phase transformation as a result of temperature variation (shape memory effect) or application of tension (superelastic behavior). The temperatures at which these phase transformations occur are key parameters for boundary conditions in applications for which the material is intended, having different properties in each phase. NiTi-based alloys are the most used because they combine the best properties associated with shape memory alloys associated with good mechanical properties. To that end, This study investigates the change in phase transformation temperatures according to the variation of the diameter of NiTi wires in superelastic regime after shape-setting (technique for obtaining the final geometry of the device under heat treatment). The study was carried out on wires of five different diameter, submitted to shape setting, that is, heat treatment in a preheated muffle furnace at 500°C for 30 minutes, in a controlled atmosphere. Thermal analyzes were performed to identify the phase transformation temperatures by the Differential Scanning Calorimetry (DSC). The results show that phase transition temperatures of the fabricated samples under shape-setting increase as the wire diameter increases. It is found, however, that the influence of the diameter on the phase transformation temperatures does not dispense with the adequate choice of heat treatment and Design of experiment, factors that combined open a range of possibilities for specification of devices that employ this type of alloy.*

Keywords: Shape Memory Alloy, Phase Transformation Temperature, Wire Diameter, DSC