

PROTÓTIPOS DE PARAFUSOS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA TI-NI: OBTENÇÃO POR FUNDIÇÃO DE PRECISÃO AUXILIADA POR IMPRESSÃO 3D E CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA

Ícaro Carvalho Dourado, icaro.carvalho@estudante.ufcg.edu.br¹

Diego Jean Freitas Vieira Novais, diegojeannovais@gmail.com¹

Raimundo Nonato Duarte Calazans, raimundo.duarte@ufcg.edu.br¹

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAE), Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, CEP: 58429-140, Campina Grande – PB, Brasil

Resumo: Um dos componentes de fixação mais utilizados pela indústria metal-mecânica é o parafuso roscado, devido a sua versatilidade e grande capacidade de união em junções não permanentes. Setores industriais como automotivo, aeronáutico e do petróleo fazem grande uso desses elementos. Contudo, nem sempre os parafusos comuns satisfazem suas exigências quando se necessita de uma maior segurança e confiabilidade. É nesse sentido que um parafuso multifuncional de Liga com Memória de Forma (LMF) pode ser uma inovação tecnológica promissora, sendo capaz de minimizar problemas como o de afrouxamento espontâneo, por aumentar a força de aperto com o aumento da temperatura. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade de fabricação de parafusos de LMF de Ti-Ni e Ti-Ni-Nb por fundição de precisão assistida por manufatura aditiva. Para isso, foi selecionada uma composição sem nióbio (Nb) e outra com 5 %at em Nb e fabricadas as ligas de base a partir dos elementos puros por fusão a arco elétrico sob atmosfera de argônio. Para a fabricação dos protótipos, moldes cerâmicos foram produzidos a partir de modelos em resina obtidos com a tecnologia de impressão 3D SLA, tendo como referência um parafuso comercial padrão M6. Foram obtidos alguns protótipos iniciais vertendo a liga de base no interior do molde cerâmico e os produtos foram avaliados quanto a presença de defeitos, precisão dimensional, e propriedades termomecânicas. Os parafusos apresentaram poucos defeitos externos aparentes, com boa precisão e sem a necessidade de muitos acabamentos após a fundição. As transformações de fase dos protótipos foram determinadas por ensaios de calorimetria DSC, observando-se a influência da adição do nióbio a liga de base Ti-Ni. Em uma avaliação preliminar, a capacidade de geração de força em função da temperatura foi verificada por ensaios de tração com câmara de aquecimento. Comparado a um parafuso comum, que se dilata e afrouxa com o aquecimento, o parafuso termoativado de LMF mostrou sua eficiência ao manter e gerar carga de aperto com aumento de temperatura até aproximadamente 100 °C.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Fundição de Precisão, Impressão 3D, Parafusos, Ligas Ti-Ni

1. INTRODUÇÃO

Os parafusos de rosca helicoidal são de extrema importância para o desenvolvimento da indústria metal-mecânica, sendo utilizados em projetos de engenharia como elementos de fixação versáteis, suportam grandes esforços. Esses elementos são fabricados a partir de ligas metálicas por meio de processos envolvendo manufatura tradicional (conformação mecânica e usinagem). No entanto, o número de inovações nesse setor é crescente e novos materiais têm surgido com potencial de aplicação em componentes fixadores (Budynas e Nisbeth, 2016). Nessa perspectiva, as ligas com memória de forma (LMF) podem ser uma alternativa inovadora, permitindo acrescentar propriedades funcionais aos conectores roscados e outros componentes mecânicos (Simões & De Araújo, 2018).

As LMF são um subconjunto de uma ampla classe de materiais inteligentes e suas funcionalidades surgem de mudanças microestruturais quando submetidas a estímulos mecânicos ou não mecânicos externos. Nessas ligas especiais, as transformações microestruturais reversíveis ocorrem sem difusão, entre a fase austenítica de alta temperatura e uma fase martensítica de mais baixa temperatura, sendo responsáveis pelo aparecimento dos fenômenos de efeito memória de forma (EMF) e superelasticidade (SE). Sua capacidade de retornar a uma forma predeterminada com o aquecimento é chamada de efeito de memória de forma (EMF) (Kumar & Lagoudas, 2008; Rao et al, 2015). Se o EMF for restringido em sua recuperação de forma, é possível gerar forças de restituição consideráveis com o aumento da temperatura.

A maior parte das LMF de interesse e disponíveis comercialmente são baseadas no sistema binário Ti-Ni, podendo haver adições ternárias de diferentes elementos de liga, com diferentes propósitos (modificar temperaturas de transformação de fase, aumentar ou diminuir a histerese em temperatura, entre outras características). Recentemente,

Medeiros & De Araujo (2021) estudaram a incorporação do nióbio (Nb), em maiores quantidades, no lugar do níquel (Ni) e a partir do Ti-Ni equiatômico, formando LMF Ti-Ni-Nb com excesso de Nb em sua microestrutura.

Em muitos sistemas mecânicos existem problemas com afrouxamento espontâneo dos parafusos em função de vibrações causadas por carregamentos dinâmicos ou por aumentos de temperatura. Outro problema comum é o desaperto após os componentes das juntas se acomodarem, gerando folgas (Eccles, 2010). Nesse cenário, pode ser possível recorrer a tecnologia de LMF para manter ou aumentar o aperto em conexões quando aquecidas durante operação. Esse pode ser o caso de peças montadas com parafusos em um bloco de motor a combustão interna, alguns componentes em aeronaves, além de juntas com flanges em tubulações que transportam fluidos diversos em alta temperatura. A Figura 1 ilustra a funcionalidade de um parafuso de LMF montado com a aplicação de um torque que gera a força interna inicial F_0 e a consequente deformação longitudinal do elemento. Quando a junta é submetida a um aumento de temperatura, o parafuso tende a se contrair por EMF, gerando uma força de recuperação adicional F_{EMF} que tende a aumentar o aperto na junta.

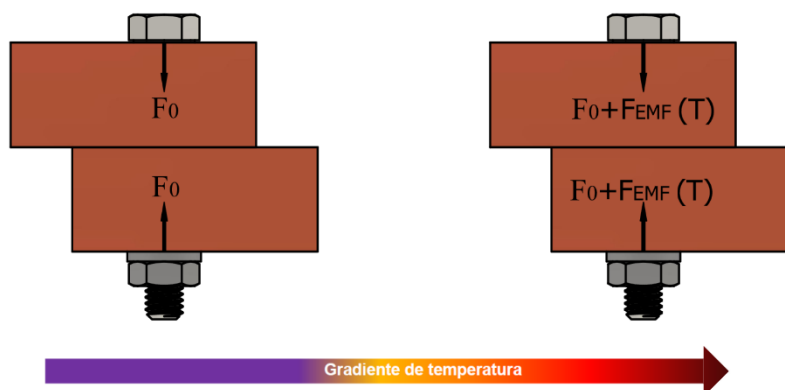


Figura 1. Esquema ilustrativo da ativação de um parafuso atuador de LMF numa junta parafusada. Autoria Própria.

A fabricação de componentes a base de LMF ainda é um desafio tecnológico. Uma vez que possuem dureza elevada, as ligas a base de Ti-Ni são de difícil usinagem, o que torna os processos de fabricação tradicionais muito dispendiosos. Contudo, recentemente tem sido mostrado que o processo de fundição de precisão com auxílio de impressão 3D, também conhecido por fundição de precisão rápida, pode ser uma alternativa interessante para a fabricação de diversos componentes mecânicos miniaturizados de LMF Ti-Ni (Simões & De Araújo, 2018; Santiago et al, 2019; Montenegro et al, 2020; Gomes et al, 2021).

Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo geral verificar a viabilidade de fabricação de parafusos de Ti-Ni e Ti-Ni-Nb por meio de fundição de precisão rápida e avaliar os protótipos obtidos por meio de uma caracterização termomecânica preliminar em termos de manutenção e geração de força interna.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A especificação adotada para os protótipos foi a do parafuso métrico de rosca parcial, de diâmetro nominal 6,0 mm (M6) (Travassos et al, 2017). As composições de LMF selecionadas foram a da liga base 50Ti-50Ni (% at.) e uma outra com substituição percentual de 5% de níquel por nióbio, resultando na liga 50Ti-45Ni-5Nb (Medeiros & De Araújo, 2021). Foram fabricados ao todo 4 (quatro) protótipos, sendo 2 (dois) da liga Ti-Ni-Nb, 1 (um) da liga de base Ti-Ni e 1 (um) de uma liga comercial Ni-Cr convencional. Diferentemente dos de Ti-Ni, esse último não possui propriedades funcionais relacionadas a transformação de fase em função da temperatura. Para a fabricação dos protótipos, foi necessária obtenção de modelos em resina e moldes cerâmicos para fundição.

2.1. Fabricação dos Modelos em Resina

A geometria do parafuso M6 com massalote foi criada em ambiente CAD (*Computer Aided Design*). Em seguida, os modelos foram fabricados por impressão 3D com a tecnologia de estereolitografia (SLA), usando uma impressora Anycubic Photon. O processo consiste na polimerização de camadas de resina por exposição de luz ultravioleta (Fig. 2a). As peças são emergidas do reservatório de resina durante o processo, por isso, ao sair da impressora precisam ser lavadas para remoção da resina líquida na superfície e secadas num processo de pós-cura. Os modelos foram limpos em álcool etílico 70% por 5 min e passaram por 2 min de pós-cura na máquina Anycubic Wash & Cure, de lavagem e pós-cura rotativa (Fig. 2b).

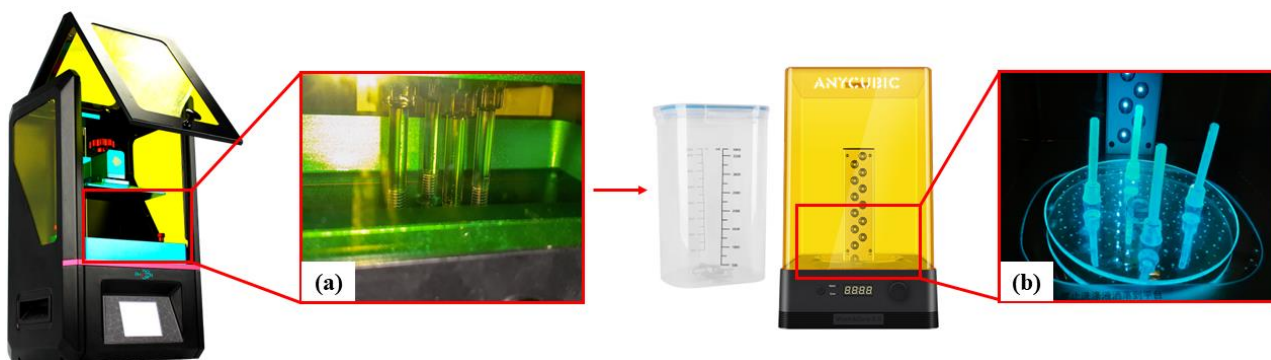


Figura 2. **Fabricação do modelo em resina por impressão 3D SLA. (a) Impressão 3D. (b) Lavagem e pós-cura.** Autoria Própria.

Os moldes cerâmicos sólidos foram produzidos pelo método da cera perdida, a partir de modelos em resina (Fig. 3a) e uso de fios de cera para o canal de saída (Fig. 3b). O revestimento cerâmico, composto por um pó ultrafino e seu líquido expander foram misturados manualmente por um tempo de 10 a 15 s e em espatulador a vácuo por 1 min. Essa mistura foi vertida em um anel metálico (Fig. 3b) sob uma mesa vibratória. Os moldes foram levados ao forno (Figs. 3c e 3d) a temperatura ambiente e então aquecidos a uma taxa de 7 °C/min até a temperatura de 250 °C, mantida por 40 min para desintegração da resina, e elevados até 900°C para sinterização da cerâmica por 30 min.

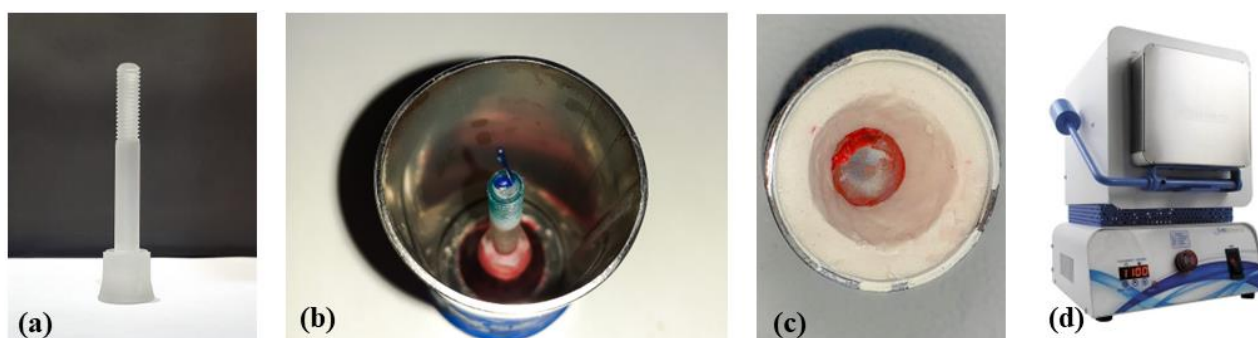


Figura 3. **Preparação dos moldes cerâmicos. (a) Modelo em resina (b) Modelo montado com cera. (c) Revestimento cerâmico. (d) Forno.** Autoria Própria.

2.2. Fabricação dos Protótipos de Parafusos

A Figura 4 permite visualizar a sequência de etapas para a fabricação dos protótipos. As cargas de Ti-Ni e Ti-Ni-Nb foram inicialmente obtidas a partir dos elementos comercialmente puros Ti, Ni e Nb (Fig. 4a), que foram cortados e pesados em balança de precisão. Os metais foram limpos com álcool isopropílico para remoção de qualquer impureza e fundidos por arco elétrico sob atmosfera de argônio (Fig. 4b). A sequência de fabricação do botão de Ti-Ni-Nb consiste em 5 fusões. As duas primeiras fusões formaram um composto de Ni-Nb, em seguida foi adicionado o Ti e realizadas mais três fusões. O arco elétrico funde o metal sobre uma fina camada dele mesmo, por isso entre uma fusão e outra a massa foi girada em 180° para que a superfície inferior seja fundida, o que deve garantir maior homogeneidade. O Ti-Ni foi fabricado de forma semelhante, sendo feitas 4 fusões com os dois elementos.

Para a injeção das LMF nos moldes cerâmicos foi usada a técnica *Skull Push-Pull* (empura-puxa), onde a carga metálica é fundida em uma câmara pressurizada com gás argônio e vertida no molde dentro de uma segunda câmara submetida a vácuo (Fig. 4d). Esse processo possui como vantagem a atmosfera controlada, o que reduz a oxidação do titânio, e injeção feita sob pressão-vácuo. Os protótipos foram injetados sob 27 – 30 Lb/Pol² de pressão e a uma vazão de 30 L/min de argônio na câmara superior e vácuo de 10 – 13 Pol-Hg na câmara inferior.

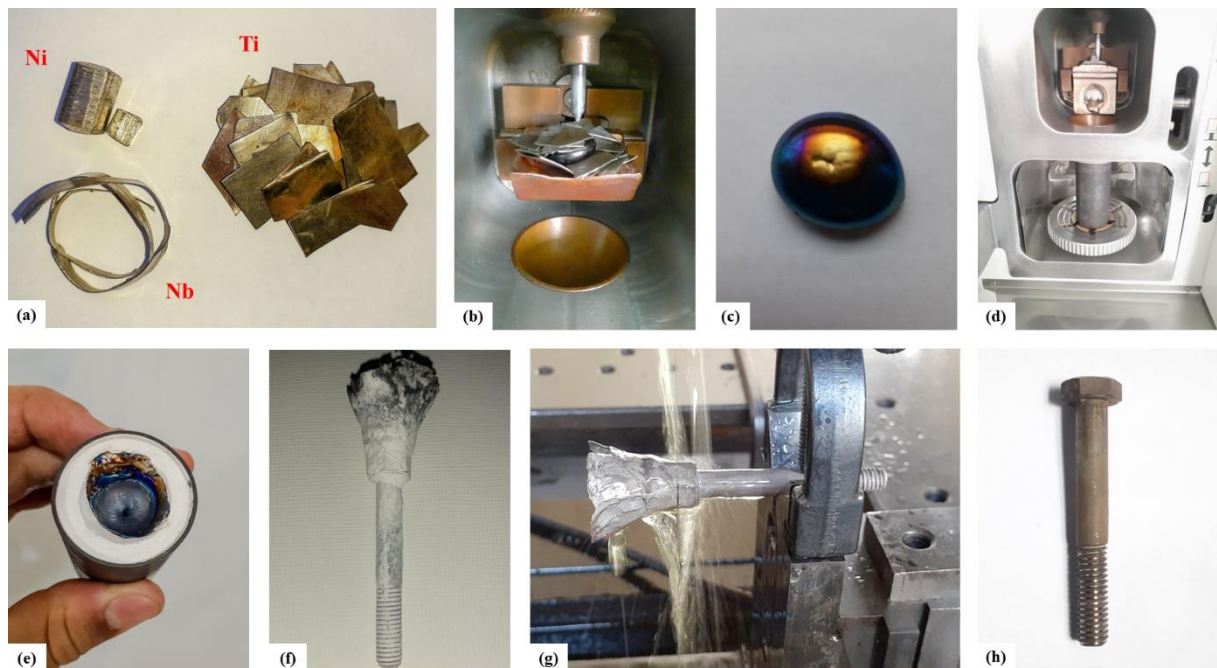


Figura 4. Processo de fabricação dos protótipos de parafusos. (a) Carga de fundição. (b) Câmara de fusão. (c) Botão da liga fundida. (d) Câmaras de fusão e vácuo. (e) Molde injetado. (f) Produto fundido. (g) Corte por eletroerosão a fio. (h) Produto acabado. Autoria Própria.

Os produtos obtidos da fundição foram desmoldados do revestimento (Fig. 4f) e submetidos a processo de acabamento, corte do massalote (Fig. 4g) e remoção de defeitos tipo bolha na superfície. Em seguida foram submetidos ao tratamento térmico de homogeneização a 900 °C por 1 hora sob atmosfera de nitrogênio e têmpera em água. Os parafusos assim obtidos foram avaliados quanto a presença de defeitos visíveis e a precisão dimensional. As medições foram realizadas com paquímetro digital e projetor de perfil, conforme indicado na Fig. 5.



Figura 5. Projeção de perfil. Autoria Própria.

2.3. Caracterização Termomecânica Preliminar

As temperaturas de transformação de fase dos protótipos foram determinadas via Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) em amostras de material retiradas da peça fundida. Os ensaios de DSC foram realizados sob atmosfera inerte de nitrogênio, no intervalo de -30°C a 120°C a uma taxa de 10°C/min durante o resfriamento e o aquecimento. Nos parafusos foram realizados ensaios de geração de força em modo de tração com câmara de aquecimento em uma máquina universal de ensaios Instron 5582. Os protótipos foram montados de acordo esquema da Fig. 6, deformados entre 0,5 e 0,6 % e aquecidos até aproximadamente 100 °C mantendo-se a deformação constante com uso de vídeo extensômetro.

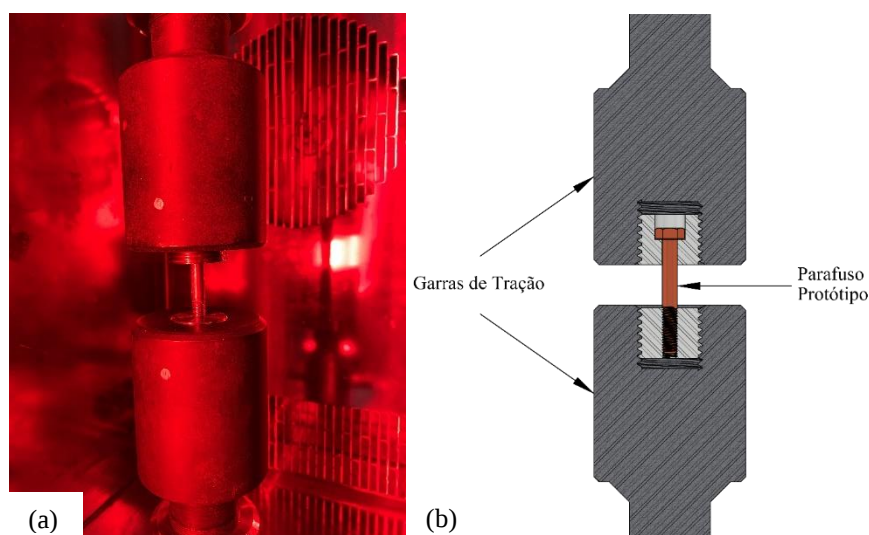


Figura 6. Montagem do ensaio de tração com aquecimento. (a) Na máquina de ensaios. (b) Esquema ilustrativo da garra. Autoria Própria.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Fabricação dos Protótipos

Conforme pode ser visualizado na Fig. 7, os protótipos obtidos apresentaram poucos defeitos externos superficiais após a desmoldagem e separação dos massalotes por corte de eletroerosão a fio (Fig. 7a). No entanto, os dois parafusos de LMF Ti-Ni-Nb apresentaram trinca de solidificação devido ao rechupe no massalote (Fig. 7b). Em um processo de acabamento na região das rosas, os parafusos foram submetidos a rosqueamento com cossinete M6 sob resfriamento em nitrogênio líquido.

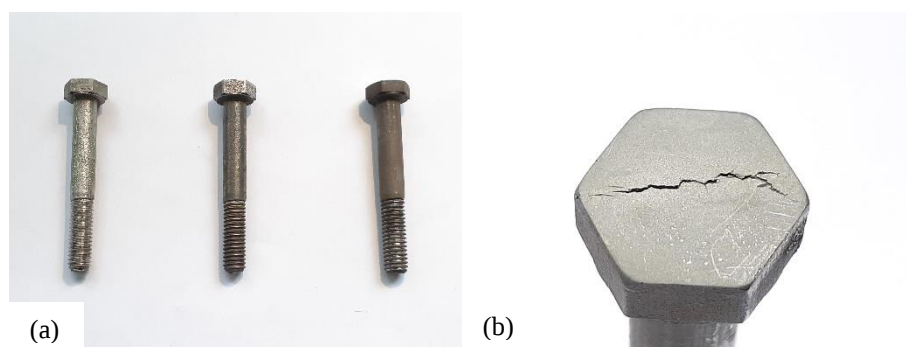


Figura 7. Parafusos obtidos por fundição de precisão rápida. (a) Protótipos de Ni-Cr, Ti-Ni e Ti-Ni-Nb, respectivamente. (b) Trinca de solidificação. Autoria Própria.

Os produtos fundidos foram comparados ao modelo em resina em termos de suas dimensões principais, conforme apresentado na Tab. 1. No geral, foi constatado um pequeno aumento dimensional devido a expansão do revestimento cerâmico em seu processo de cura.

Tabela 1. Análise dimensional dos protótipos. Dimensões em mm. Autoria Própria.

Protótipo	Largura da cabeça	Diâmetro Nominal	Diâmetro externo da rosca	Diâmetro interno da rosca	Comprimento
Nominal	10,00	6,00	5,78	4,77	44,60
Modelo	10,01±0,01	6,03±0,01	5,80±0,05	4,66±0,03	44,93±0,01
NiCr	10,23±0,09	6,20±0,04	5,87±0,02	4,79±0,05	45,20±0,03
NiTi	10,21±0,02	6,20±0,03	5,88±0,01	4,81±0,03	45,55±0,08
NiTiNb	10,18±0,01	6,18±0,03	5,93±0,01	4,79±0,04	44,92±0,03

3.2. Caracterização Térmica

Conforme mostrado na Fig. 8 e Tab. 2, os resultados de DSC permitiram obter as temperaturas de transformação de fase usando o método das tangentes, conforme a norma ASTM F 2004-05 (*Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel - Titanium Alloys by Thermal Analysis*). Além disso, foram obtidas as entalpias de transformação de fase (ΔH) a partir das áreas dos picos de transformação e os valores de histerese em temperatura (H_T) a partir das temperaturas de pico.

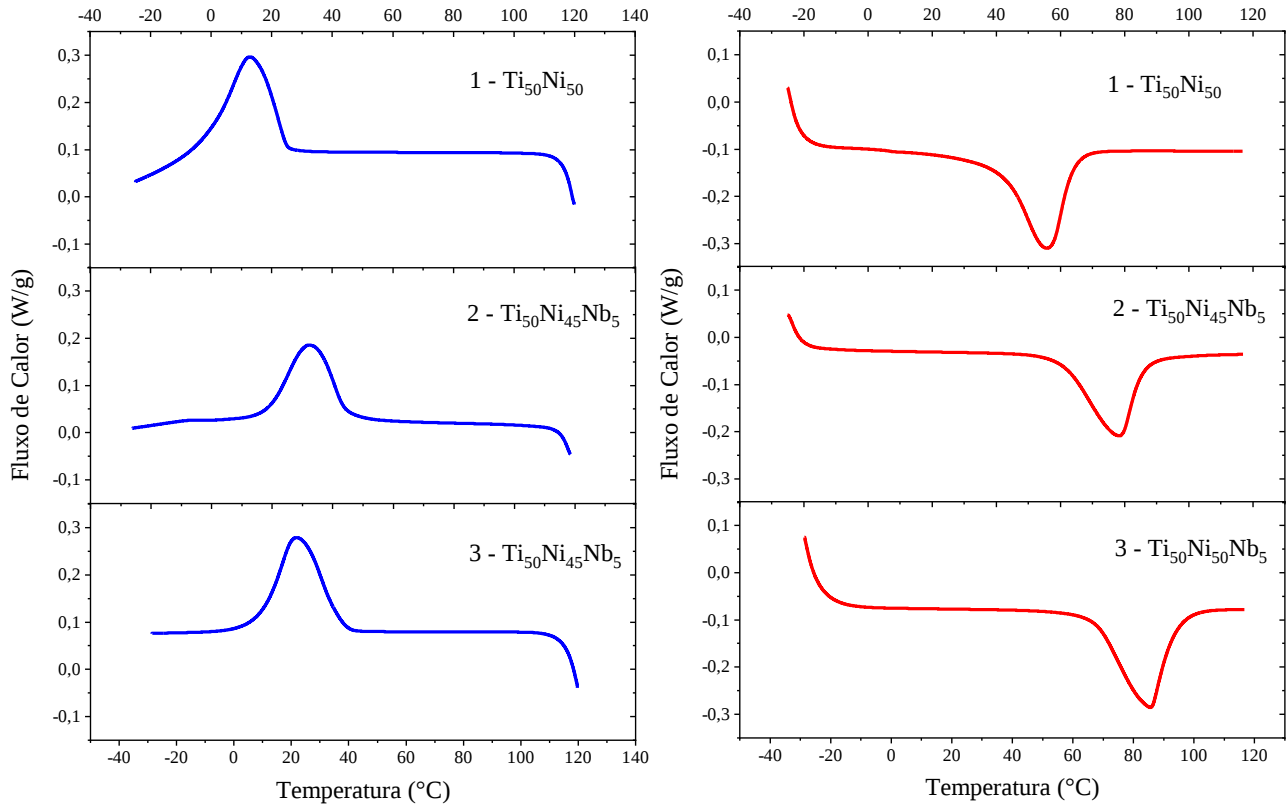


Figura 8. Curvas de DSC dos parafusos de LMF. Autoria Própria.

Tabela 2. Temperaturas de transformação, histerese térmica e entalpias de transformação dos protótipos de LMF obtidas por DSC. Autoria Própria.

	Temperaturas de Transformação (°C)				H_T (°C)	ΔH (J/g)	
	M_s	M_f	A_s	A_f		Resfriamento	Aquecimento
1 - Ti-Ni	25,2	1,3	41,0	64,6	43,0	20,5	20,9
2 - Ti-Ni-Nb	44,8	18,5	60,3	86,4	46,3	17,1	17,9
3 - Ti-Ni-Nb	37,1	9,0	66,6	95,2	63,7	21,9	22,2

M_s – Martensita inicial; M_f – Martensita final; A_s – Austenita inicial; A_f – Austenita final; H_T – Histerese térmica; ΔH – Entalpia de transformação de fase.

3.3. Caracterização Termomecânica Preliminar

Para os ensaios de geração de força, os parafusos foram primeiro tracionados até 0,5 – 0,6 % e aquecidos mantendo-se a deformação constante. Nas Figuras 9 e 10 observa-se o afrouxamento do parafuso de Ni-Cr e a manutenção seguida do aumento do aperto do parafuso de Ti-Ni devido a tensão de recuperação gerada pela transformação de fase (ilustrada na Fig. 1). Como pode ser melhor constatado na Fig. 10, o parafuso de Ni-Cr sofreu uma queda de tensão com o aumento da temperatura. Entretanto, o parafuso termoativado de Ti-Ni gerou um discreto aumento de tensão. Ressalta-se que a aplicação de apenas 0,6 % de deformação ao protótipo de Ti-Ni foi conservadora, para evitar problemas de ruptura prematura devido a eventuais defeitos internos no produto fundido. Tensões de recuperação bem mais elevadas podem ser obtidas com deformações maiores, superiores a 1 %. Infelizmente os protótipos de LMF Ti-Ni-Nb romperam de forma prematura durante os ensaios, devido aos defeitos nas cabeças dos parafusos, conforme mostrado na Fig. 7(b).

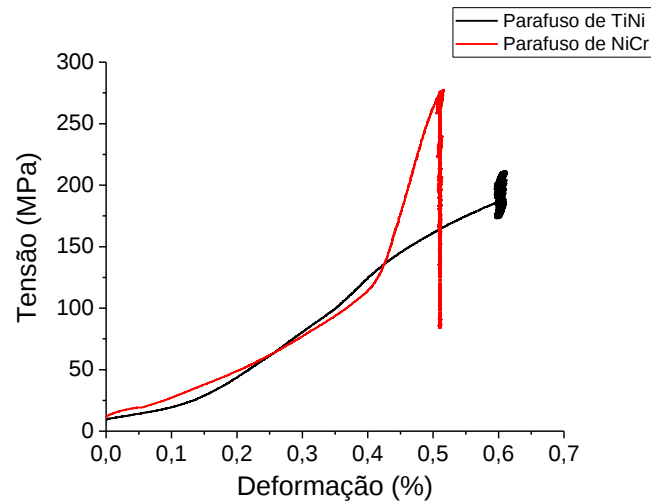


Figura 9. Comportamento tensão vs deformação, com aquecimento a partir de 0,5-0,6%. Autoria Própria.

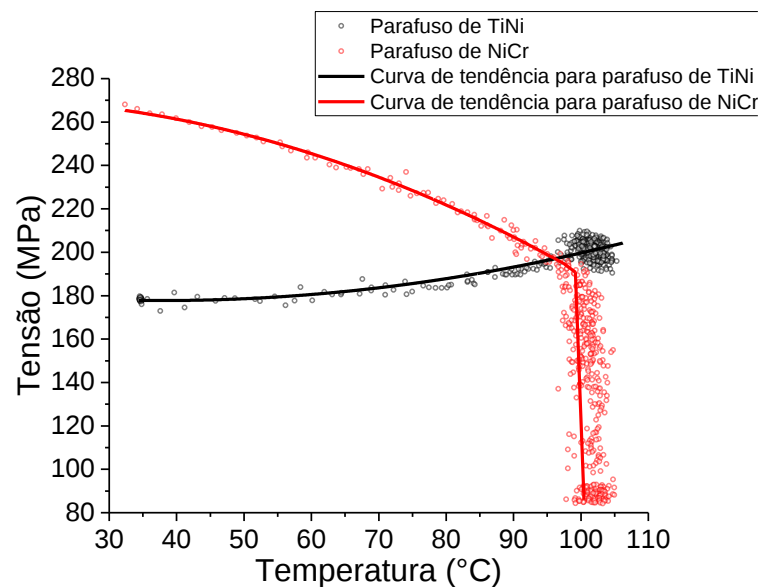


Figura 10. Tensão de recuperação em função da temperatura. Autoria Própria.

Na Figura 11 é possível avaliar o comportamento dos parafusos em função do tempo de aquecimento. Após ser mantida na temperatura final de 100 °C por um período de cerca de 30 minutos, a montagem atingiu seu equilíbrio térmico. O parafuso comum de Ni-Cr (Fig. 11a) exibiu um contínuo decaimento de tensão após essa estabilização enquanto o parafuso de Ti-Ni (Fig. 11b), após uma importante geração de força interna entre 30 °C e 100 °C, mostrou uma leve queda após atingir a tensão máxima (da ordem de 205 MPa). No entanto, mesmo com esse ligeiro decaimento, a carga final foi ainda bem superior a inicial (aproximadamente 195 MPa).

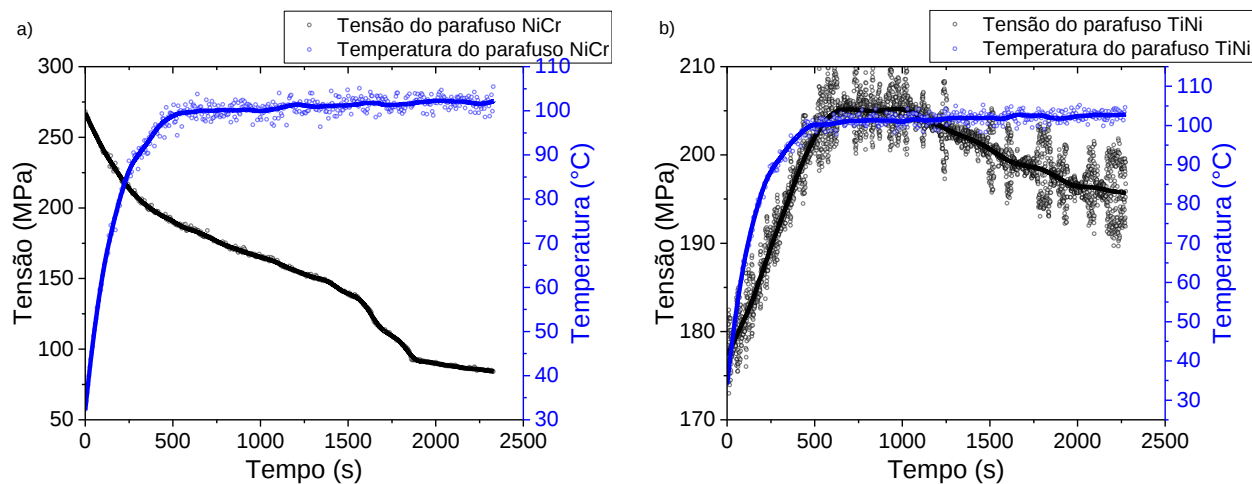


Figura 11. Tensão de recuperação em função do tempo. (a) Parafuso de NiCr (b) Parafuso de TiNi. Autoria Própria.

4. CONCLUSÃO

A fabricação de protótipos de parafusos por meio da técnica de fundição de precisão rápida se mostrou viável e promissora, revelando a necessidade de melhorias no processo que levem a redução dos defeitos responsáveis pela falha prematura dos protótipos de Ti-Ni-Nb. No geral, foi constatado que os protótipos obtidos apresentaram precisão dimensional aceitável para a aplicação. Com a comparação do comportamento entre os parafusos convencional de Ni-Cr e termoativado de Ti-Ni, sob uma deformação constante e aumento da temperatura, se comprovou a eficiência da manutenção e geração de força interna por meio de liga com memória de forma. A adição do nióbio levou a uma mudança nas temperaturas de transformação de fase e ao aumento da histerese térmica dos protótipos. No entanto, não foi possível acompanhar a geração de força nos parafusos de Ti-Ni-Nb devido a presença de defeitos oriundos da fundição, que podem ser resolvidos com a adição de mais massa a carga de fundição para compensar a contração do rechepe na região do massalote.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos seguintes projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Proc. 574001/2008-5), Universal 01/2016 (Proc. 401128/2016-4) e PQ 1C (Proc. 302740/2018-0), e ao FNDE/MEC pelo financiamento do Programa de Educação Tutorial de Engenharia Mecânica da UFCG (PETMEC-CG).

6. REFERÊNCIAS

- Budynas, R. G., & Nisbeth, J. K. (2016). Elementos de Máquinas de Shigley. 10ª Edição. McGraw Hill Brasil.
- Eccles, W. (2010). Tribological aspects of the self-loosening of threaded fasteners (Doctoral dissertation, University of Central Lancashire).
- Gomes, A. A. C., Grassi, E. N. D., Silva, P. C. S., De Araújo, C. J. (2021). Mechanical behavior of a NiTi superelastic bone plate obtained by investment casting assisted by additive manufacturing. *Smart Materials and Structures*, v. 30, p. 025009.
- Kumar, P. K., & Lagoudas, D. C. (2008). Introduction to shape memory alloys. In *Shape memory alloys* (pp. 1-51). Springer, Boston, MA.
- Medeiros, M. A. R. & de Araújo, C. J. (2021). Thermal, microstructural and elastic modulus behavior of $Ti_{50}Ni_{50-x}Nb_x$ ($x=0-25\%$ at) shape memory alloys obtained by plasma arc melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 866, 158970.
- Montenegro, E. O. S., Grassi, E. N. D., Simões, J. B., Silva, P. C. S., de Araújo, C. J. (2020). NiTi shape memory alloy cellular meshes: manufacturing by investment casting and characterization. *Smart Materials and Structures*, v. 29, p. 125008.
- Rao, A., Srinivasa, A. R., & Reddy, J. N. (2015). Design of shape memory alloy (SMA) actuators. Springer International Publishing.
- Santiago, J. J. M., Simões, J. B., De Araújo, C. J. (2019). Thermomechanical Characterization of Superelastic Ni-Ti SMA Helical Extension Springs Manufactured by Investment Casting. *Materials Research*, v. 22, p. e20180852.
- Simões, J. B., De Araújo, C. J. (2018). Nickel-titanium shape memory alloy mechanical components produced by investment casting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 29 (19), 3748-3757.

Travassos, G. D., Rodrigues, L. F. A., & de Araújo, C. J. (2017). Fabrication and thermomechanical characterization of a new Cu–Al–Ni–Mn–Ti shape memory alloy bolt. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(4), 1269-1275.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PROTOTYPES OF BOLTS IN TI-NI SHAPE MEMORY ALLOY: FABRICATION BY INVESTMENT CASTING ASSISTED BY 3D PRINTING AND THERMOMECHANICAL CHARACTERIZATION

Ícaro Carvalho Dourado, icaro.carvalho@estudante.ufcg.edu.br¹

Diego Jean Freitas Vieira Novais, diegojeannovais@gmail.com¹

Raimundo Nonato Duarte Calazans, raimundo.duarte@ufcg.edu.br¹

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Federal University of Campina Grande (UFCG), Academic Unit of Mechanical Engineering (UAEM), Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, CEP: 58429-140, Campina Grande – PB, Brazil

Abstract. One of the most used fastening components by the metal-mechanic industry is the threaded bolt, due to its versatility and great capacity for joining in non-permanent joints. Industrial sectors such as automotive, aeronautics and petroleum make great use of these elements. However, common bolts do not always satisfy your demands when you need greater security and reliability. It is in this sense that a multifunctional Shape Memory Alloy (SMA) bolt can be a promising technological innovation, be capable to minimize problems such as spontaneous loosening by increasing the pressing down force with increasing temperature. In this context, the present work objective to verify the viability of manufacturing bolts from a Ti-Ni-Nb SMA by precision casting assisted by additive manufacturing. For this, a composition with 5 %at in Nb was selected and the base alloy was manufactured from the pure elements by electric arc melting under an argon atmosphere. For the manufacture of the prototypes, ceramic molds were produced from resin models obtained with SLA 3D printing technology, using a standard commercial M6 bolt as a reference. Some initial prototypes were obtained by pouring the base alloy into the ceramic investment and the products were evaluated for the presence of defects, dimensional accuracy, and thermomechanical properties. The bolts showed few apparent external defects, with good accuracy and without the need for much finishing after casting. The phase transformations of the prototypes were determined by a DSC calorimetry test, in which the influence of the addition of niobium to the Ti-Ni base alloy was observed. In a preliminary evaluation the capacity to generate force as a function of temperature was verified by tensile tests with a heating chamber. Compared to a common bolt, which expands and loosens with heating, the SMA thermoactivated bolt has shown its efficiency in generating pressing down load.

Keywords: Shape Memory Alloys, Investment Casting, 3D Printing, Bolts, Ti-Ni Alloys