

## **Construção de um sistema de banho térmico regulável adaptável a uma máquina de ensaio universal com o objetivo de desenvolver caracterizações eletrotermomecânicas em ligas e compósitos GFRP/NITI com efeito de memória de forma**

Paulo Ricardo de Oliveira Queiroz, pauloricardo.eq@hotmail.com<sup>1</sup>

Zoroastro Torres Vilar, zoroastro@ufersa.edu.br<sup>1</sup>

Cauê Coelho Alves, caue20@hotmail.com<sup>1</sup>

William Jonathan Lopes Bezerra, william\_tkd@hotmail.com<sup>1</sup>

Luiz Paulo de Oliveira Queiroz, luiz.paulo@ifce.edu.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró/RN- Av. Francisco Mota, 572 ,

<sup>2</sup>Instituto Federal do Ceará (IFCE), Limoeiro/CE, Rua Estevão Remígio, 1145,

**Resumo:** Com a necessidade de se conhecer novas propriedades dos materiais, foi desenvolvido, no laboratório de projetos mecânicos, da Universidade federal Rural do Semi-Árido, um protótipo com o objetivo de possibilitar a caracterização eletrotermomecânica de materiais metálicos, ligas e compósitos ativos à base de NITI. Este projeto consiste em um banho térmico regulável, onde é possível variar e controlar a temperatura durante todos os ensaios, para analisar diversas propriedades, como: resistência elétrica, tensão elétrica, mudanças de fase dos materiais, além de verificar a transição dúctil/frágil de alguns elementos. Este protótipo foi fabricado com uma adaptação para a máquina universal do tipo EMIC, de forma a unir o dispositivo desenvolvido a máquina de ensaios, transformando em um sistema termomecânico. Com esse sistema, já foi possível verificar a capacidade de ativação de ligas metálicas e compósitos com ligas de NiTi embutidas, os quais apresentaram variação positiva de módulo de elasticidade ao serem aquecidos acima da temperatura de transformação das lâminas de NiTi.

**Palavras-chave:** protótipo, compósito, NiTi

### **1. INTRODUÇÃO**

O grande desenvolvimento que a engenharia vem proporcionando para o setor produtivo mundial, induz de forma instantânea a realização de pesquisas, na qual venham favorecer a evolução e o crescimento das tecnologias. Um dos principais pilares de estudo são os materiais mecânicos. Estes, quando utilizados de forma correta, são responsáveis pelo progresso de muitas empresas. Dessa forma, torna-se viável estudar as propriedades mecânicas dos materiais, analisar sua relevância e sua disposição inovadora.

O estudo e a caracterização de materiais é uma área importante, pois permite a seleção adequada do material fundamentado no desempenho do sistema em trabalho, além de orientar para o desenvolvimento de novos materiais. Dependendo da linha de pesquisa a que o material ou o sistema será submetido, a caracterização poderá abranger a avaliação de propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas, óticas, químicas ou térmicas. Um dos métodos que vem sendo muito difundido nos laboratórios de engenharia de materiais é a caracterização através do banho térmico. Este sistema é utilizado como fonte de ativação térmica, na qual o material em estudo é embebido por um fluido com temperaturas de fusão e ebulição adequadas para o objeto de análise e sobre ele, dependendo da propriedade que se deseja obter, é conectado uma fonte de corrente contínua e uma unidade de aquisição de dados.

Pesquisas recentes demonstram que a utilização desse sistema em materiais inteligentes tem sido bastante eficaz. Materiais inteligentes são elementos capazes de reduzir custos e aperfeiçoar operações, sua capacidade adaptativa proporciona um desempenho diferenciado dos sistemas de engenharia. Em essência, esses materiais são caracterizados pelo acoplamento entre meios físicos diferentes, o que lhes confere características singulares que podem ser aplicadas de diferentes formas. O uso dos materiais inteligentes na vida cotidiana é uma realidade que vem se ampliando nos últimos anos. A utilização desses materiais permite imaginar sistemas mais eficientes e versáteis com reflexos na qualidade de vida, segurança e inovação. Dentro da classe de matérias inteligentes podemos citar as cerâmicas piezelétricas, que são elementos capazes de transformar esforços em corrente elétrica, fluidos eletro e magneto-reológicos e ligas com memória de forma (LMF) [1].

No estudo do caso, inicialmente utilizaram-se ligas de NITI com efeito de memória de forma, em formatos de fios e Lâminas, como elementos de avaliação. A proposta foi inseri-las no banho térmico regulável, utilizando uma fonte de corrente contínua, um sistema de aquisição de dados e uma máquina de ensaios universal, com o objetivo de possibilitar a caracterização eletrotermomecânica. Esta caracterização pode ser aplicada em qualquer tipo de material, para o caso das ligas LMF, esta importância enfatiza-se pelas suas grandes aplicações, as quais podem ser vista em robótica, biomecânica, indústrias navais, nuclear, aeronáutica e automobilística.

Neste trabalho é apresentado o projeto, a fabricação e a montagem de um protótipo para ensaios de natureza eletrotermomecânica, com o objetivo de possibilitar a caracterização de matérias metálicas, ligas e compósitos ativos à base de NITI e determinar as propriedades, como: variação do módulo de elasticidade dos materiais em função da temperatura, análise das fases martensitas e austenitas das ligas de NITI e resistência elétrica

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, foi elaborado um planejamento do projeto, com o intuito de identificar a estrutura adequada para o banho térmico regulável. Desta feita, desenvolveu-se um protótipo através de um software de simulação e modelagem Siemens NX, com o objetivo de realizar caracterizações termomecânicas em diferentes materiais mecânicos, através de ensaios de tração, flexão e resistência dois pontos. O banho térmico regulável, como relatado anteriormente, possui uma adaptação desenvolvida para realizar ensaios em máquinas universais do tipo Emic, dessa forma, para atender todos os critérios do sistema foi necessário fabricar algumas peças, tais como: 2 suportes, 2 garras, 1 cuba, 1 barra, 1 compressor, 1 ventoinha, 1 condensador, 1 válvula, 1 termopar e 1 serpentina. Logo abaixo, na fig. 1, podemos ver algumas peças do sistema de banho térmico modelados pelo software.

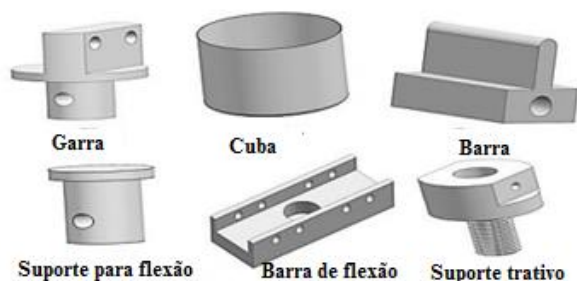


Figura1. Modelagem das peças para o banho térmico adaptável

### 2.1. Fabricação das peças

Todas as peças foram fabricadas no laboratório de produção mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), utilizando para seu processo de fabricação 2 máquinas essenciais na área de usinagem, o torno mecânico tipo Nardini 306 e a fresadora ferramenta do tipo Nardini. Os materiais utilizados para a manufatura das peças foram selecionados de forma a atender a viabilidade econômica do projeto e a facilidade de fabricação, dessa forma o material escolhido para todas as peças foi o Aço SAE 1020, atendendo assim a todos os critérios estabelecidos pelo projeto. Abaixo, na fig. 2 pode-se visualizar algumas imagens do protótipo fabricado.

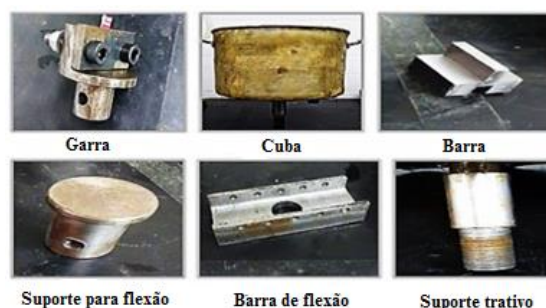
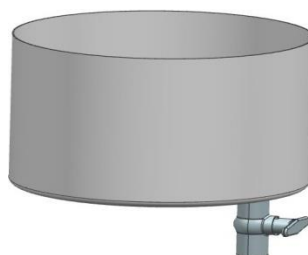


Figura 2. Peças para o banho térmico, fabricadas pelo processo de usinagem

### 2.2. Características do Processo

Como o método de caracterização das amostras necessita de um controle de temperatura durante o banho térmico, utilizou-se na cuba, um revestimento com fibra de vidro, com o propósito de evitar trocas de calor durante o processo com o meio ambiente e controlar a inércia térmica durante a realização dos ensaios. Outra observação importante no processo foi a utilização do silicone como fluido principal para a realização dos ensaios. Como as análises tinham uma variação de temperatura entre -10 a 110 °C, seria inviável utilizar um fluido com pontos de fusão e evaporação dentro desse intervalo, como por exemplo a água, portando, diante da necessidade, selecionou-se um líquido com

características superiores aos dados de referência. Este fluido foi o óleo de silicone, um líquido incolor e inerte, usado como lubrificante para vários fins por manter suas propriedades em uma ampla faixa de temperatura. Suas temperaturas de fusão e ebulição são respectivamente  $-55$  e  $145$  °C, Logo um faixa de temperatura ideal para a realização da caracterização dos materiais. Abaixo, na figura 3, pode-se ver a cuba juntamente com a válvula registro, projetada com auxílio do software Siemens NX.



**Figura 3. Projeto da Cuba e válvula registro**

### 2.3. Sistema de refrigeração e aquecimento

Para a realização da caracterização termomecânica das ligas, é necessário associar ao projeto da cuba, um sistema de refrigeração e aquecimento, o qual pode ser visualizado na figura 4. O Sistema de refrigeração utilizado neste trabalho é constituído por: compressor hermético (1), Condensador (2), cuba+evaporador (3) e válvula de expansão (4). Este sistema é baseado no ciclo real de refrigeração e é utilizado para refrigerar as amostras até  $-10$  °C. Já o sistema de aquecimento é composto apenas por um aquecedor portátil, no qual é responsável pelo aquecimento das amostras até  $110$  °C. A união desses sistemas tem como objetivo ativar as amostras para coletar dados das suas propriedades mecânicas e elétricas.



**Figura 4. Sistema de refrigeração e aquecimento utilizados durante os ensaios**

### 2.4. Controle da temperatura

Uma das características importantes para o sistema termoregulável é o controle das temperaturas do processo. Neste trabalho, o controle foi efetuado através de controladores de temperaturas eletrônicos, figura 5, que tinham a função de estabilizar as temperaturas nos pontos de trabalho, com o objetivo de analisar através de ensaios termomecânicos, como se comportaria as propriedades de cada material variando-se a temperatura a cada  $10$  °C. Esta análise tem grande relevância, uma vez que através dela, pode-se garantir o comportamento de um material sob diferentes condições de temperatura e ao mesmo tempo identificar em qual fase se encontram.



**Figura 5. Estabilização das temperaturas no controlador e na unidade de aquisição**

### 2.5. Caracterização eletrotérmica das Ligas NITI

Para realizar a caracterização eletrotérmica das ligas, no caso as com efeito de memória de forma é necessário impor uma variação de temperatura suficiente para promover a mudança de fase. Como meio de aquecimento para ativação, utiliza-se geralmente duas formas, a primeira consiste na aplicação de uma corrente elétrica que aquece o

material por efeito joule e a segunda consiste na ativação térmica do material através de aquecimento e/ou resfriamento por uma fonte externa, no qual o material é submetido a variações de temperaturas e consequentemente ensaiado em várias condições para análise das propriedades. Dessa forma, com os dados indicados pelos ensaios, pode-se identificar como cada material se comporta em cada temperatura e em cada fase da sua constituição. Um dos ensaios realizados foi o do tipo RET (resistência/Temperatura). Neste foi possível detectar a variação da resistência elétrica em cada temperatura de trabalho. Na figura 6, pode-se ver a configuração utilizada para realizar esses ensaios.



**Figura 6. Lâmina de NiTi conectada a fonte elétrica e imersa no banho térmico**

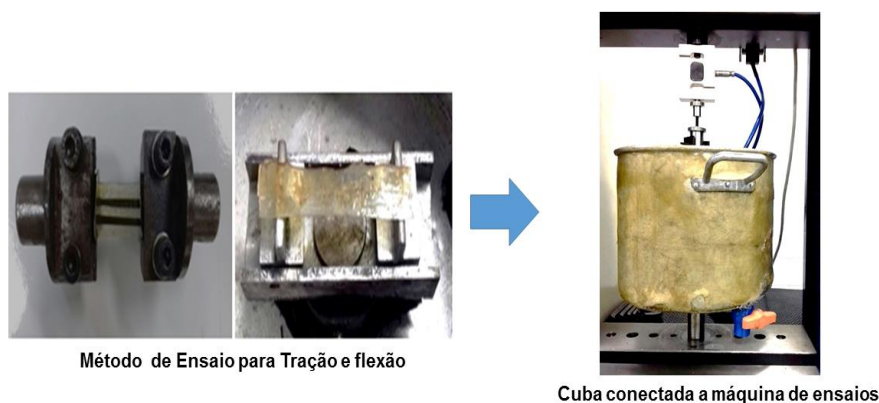
Nesta pesquisa, utilizou uma unidade de aquisição de dados LXI, figura 7, o mesmo possui até 11 sinais de entrada diferentes, incluindo temperatura com termopares, termorresistências (RTDs) e termistores, tensão ou corrente CC/CA, resistência a 2 ou 4 fios, frequência e período [2]. Este equipamento foi disponibilizado pela universidade federal rural do Semi- Árido. Através dele foi possível realizar ensaios de resistência dois fios, tensão elétrica e registrar o comportamento das ligas NITI entre as temperaturas  $-10$  a  $110^{\circ}\text{C}$ , utilizando o banho termoregulável. No total, foram investigadas 9 amostras de fios NITI tratadas termicamente, com diferentes taxas de aquecimentos, e 1 amostra de Lâmina NITI, onde determinou-se através de ensaios eletrotérmicos, parâmetros físicos de cada amostra, tais como: temperaturas críticas de transformações, a variação dessas temperaturas ao longo dos ciclos térmicos de trabalho mecânico realizado e a análise da histerese térmica durante as transformações de fase austenítica- martensítica.



**Figura 7. Unidade de aquisição de dados LXI**

## 2.6. Caracterização termomecânica das ligas NITI

Para verificar o comportamento termomecânico das ligas NITI, deve-se inicial aquece-las ou resfria-las a uma determinada temperatura e em seguida realizar ensaios de tração ou flexão. Na figura 8, temos um exemplo do arranjo adotado para os ensaios de tração e flexão respectivamente. No caso dos ensaios de tração, para fixação das amostras é necessário manter a área de contato entre as garras em perfeito alinhamento, além da superfície bastante polida, pois como algumas amostras são frágeis e têm áreas muito pequenas, o risco de deslizamento ou ruptura dentro do dispositivo é muito alto. Após a fixação do material na máquina de ensaios, liga-se o sistema de refrigeração ou aquecimento e determina em quais temperaturas o sistema de controle deverá manter constantes as temperaturas, para proceder aos ensaios mecânicos.



**Figura 8. Configuração das amostras para os ensaios de tração e flexão**

### 3. RESULTADOS

Com o projeto do banho, conseguiu-se obter resultados bastante satisfatórios. Nos ensaios eletrotérmicos do tipo RET, o sistema quantificou temperaturas negativas e positivas entre (-10 a 110 °C), na qual foi possível desenvolver curvas de transformação de fase Austenita-Martensita nas Lâminas e nos fios de NITI. Estas fases podem ser identificadas através dos picos crescentes e decrescentes de resistência elétrica. Para esta identificação, utilizou-se o método das tangentes, como pode ser visualizado na figura 9 e 10. Outro ponto importante, agora nos ensaios termomecânicos, foi a eficácia das análises de flexão e tração. Com o auxílio da máquina de ensaios universal e com os compósitos GFRP/NITI (Glass Fiber Reinforced Polymer) embebidos com silicone, analisou-se o comportamento do módulo elástico das amostras em diferentes temperaturas, onde foi possível observar sua variação em função da temperatura. Neste ensaio utilizou 3 amostras e Segundo Xu, Y, esperava-se um comportamento positivo em relação ao módulo elástico das ligas com o aumento da temperatura, dessa forma, como podemos visualizar no gráfico da figura 11. Este gráfico segue coerentemente a fonte citada, onde o módulo elástico aumenta progressivamente no ponto 70°C, justamente onde ocorre a transformação de fase da liga NITI. De forma indireta, este equipamento abriu oportunidade para outros estudos de interesse nesta área, com outros materiais, como por exemplo avaliar a temperatura de transição vítrea em materiais amorfos entre um estado relativamente rígido e um estado mole e “borrachoso”.

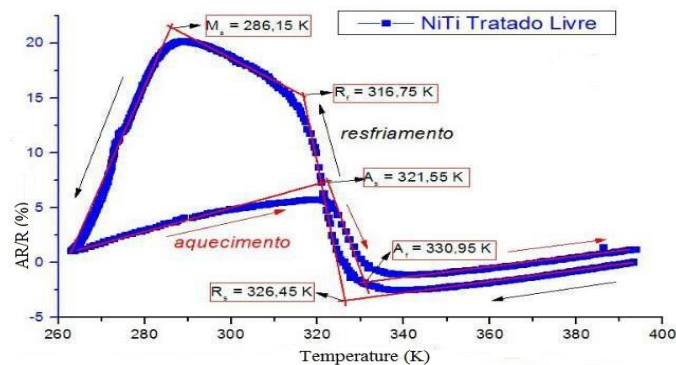


Figura 9. Caracterização eletrotérmica do fio NITI – Ensaio RET

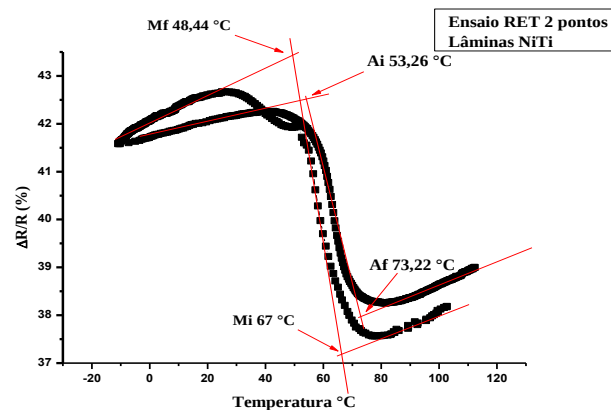


Figura 10. Caracterização eletrotérmica da Lâmina NITI – Ensaio RET

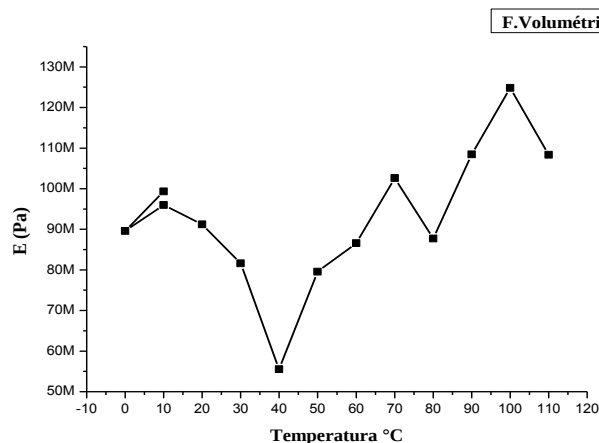


Figura 11. Caracterização termomecânica do compósito GRFP/NITI

#### 4. CONCLUSÃO

O banho térmico regulável mostrou-se bastante eficiente quanto a sua utilização. Mesmo sendo um protótipo, seus dados fornecidos durante os ensaios, demonstraram que além da sua viabilidade econômica, na qual é de grande relevância para o projeto, o seu poder de caracterização durante os ensaios dos materiais, é semelhante aos tradicionais equipamentos utilizados para este processo, como o banho termométrico tradicional DMA. Dessa forma, torna-se viável validar este equipamento, uma vez que o mesmo apresenta todas as funcionalidades e características essenciais para realização dos ensaios de forma confiável.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado Pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido

#### 6. REFERÊNCIAS

- SAVI, Marcelo; OLIVEIRA, Sérgio A.. Os Materiais Inteligentes e suas Aplicações. **Revista Marítima Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 8, p.22-55, abr. 2013.
- TECHNOLOGIES, Keysight. **34972A Unidade de aquisição, comutação e registro de dados LXI**. Disponível em: <<https://www.keysight.com/pt/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unitcc=BR&lc=por>>. Acesso em: 24 nov. 2017.
- Xu, Y.; Otsuka, K.; Nagai, H.; Yoshida, H.; Asai, M.; Kishi, T.; *A SMA/CFRP Hybrid Composite with Damage Suppression Effect at Ambient Temperature*. Scripta Materialia, v. 49, pp. 587–593, 2003.
- Barret, C. *Launch Vehicle Flight Control Augmentation Using Smart Materials and Advanced Composites*. Alabama: NASA Technical Report, pp. 1-62; 1995.
- Tsoi, K. A.; Schrooten, J.; Zheng, Y.; Stalmans, R. *Thermomechanical Response of TiNi Fiber-Impregnated CFRP Composites*. Materials Letters; v. 59, pp. 2472 – 2475, 2005.

#### 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O Autor é o único responsável pelo conteúdo deste trabalho.

### **Construction of an adjustable thermal bath system adaptable to a universal test machine with the objective of developing electrothermomechanical characterizations in GFRP / NITI alloys and composites with shape memory effect**

Paulo Ricardo de Oliveira Queiroz, pauloricardo.eq@hotmail.com<sup>1</sup>  
Zoroastro Torres Vilar, zoroastro@ufersa.edu.br<sup>1</sup>  
Cauê Coelho Alves, caue20\_@hotmail.com<sup>1</sup>  
William Jonathan Lopes Bezerra, william\_-tkd@hotmail.com<sup>1</sup>  
Luiz Paulo de Oliveira Queiroz, luiz.paulo@ifce.edu.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Rural University of the Semi-Arid (UFERSA), Mossoró / RN- Av. Francisco Mota, 572,

<sup>2</sup>Federal Institute of Ceará (IFCE), Limoeiro / CE, Rua Estevão Remígio, 1145,

**Abstract.** With the need to know new properties of the materials, a prototype was developed in the mechanical design laboratory of the Federal Rural University of the Semi-Arid, with the objective of enabling the electrothermomechanical characterization of metallic materials, alloys and active composites based on NITI. This design consists of an adjustable thermal bath, where it is possible to vary and control the temperature during all the tests, to analyze several properties, such as: electrical resistance, electrical voltage, phase changes of materials, and verify the ductile / some elements. This prototype was fabricated with an adaptation to the universal machine of the EMIC type, in order to join the device developed to the test machine, transforming into a thermomechanical system. With this system, it was possible to verify the activation capacity of metallic alloys and composites with embedded NiTi alloys, which showed a positive modulus of elasticity when heated above the transformation temperature of the NiTi slides.

**Keywords:** prototype, composite, NiTi