



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ

**FABRICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO
TERMOMECÂNICA.**

MOSSORÓ

2018

PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ

**FABRICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO
TERMOMECÂNICA.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Zoroastro Torres
Vilar-UFERSA.

MOSSORÓ

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

OQf Oliveira Queiroz, Paulo Ricardo .
 FABRICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA PARA
 CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA / Paulo Ricardo
 Oliveira Queiroz. - 2018.
 39 f. : il.

 Orientador: Zoroastro Torres Vilar.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2018.

 1. Protótipo. 2. Ensaios. 3. NiTi. 4.
 Termomecânico. I. Torres Vilar, Zoroastro, orient.
 II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

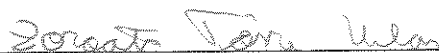
PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ

**FABRICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO
TERMOMECÂNICA.**

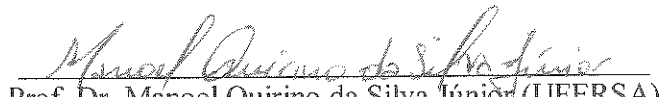
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 18 / 04 / 2018.

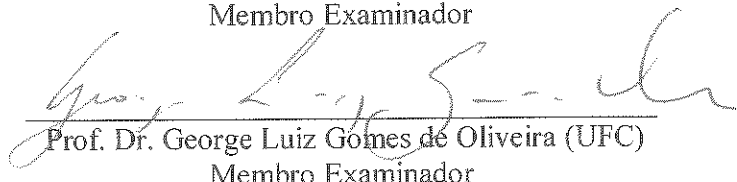
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar (UFERSA)
Presidente



Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira (UFC)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, pela vida, pela oportunidade cedida e por guiar todos os passos da minha vida.

Aos meus Pais: Paulo Francisco de Queiroz e Alcineide de Oliveira Fonseca Queiroz por sempre me apoiar em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins durante este percurso acadêmico, pela educação proporcionada, e por se dedicar intensamente na geração de recursos para a conclusão da presente graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar, pela disponibilidade e horas de dedicação para me ajudar a concluir o presente trabalho, pelo apoio acadêmico, pela confiança e por estimular incansavelmente na busca pelos meus objetivos.

Ao meu irmão, Prof. Me. Luiz Paulo de Oliveira Queiroz do Instituto Federal do Ceará, por me ajudar a alcançar todos os objetivos para a conclusão do curso.

A minha namorada Renata Letícia dos Santos Serafim, que suportou e entendeu minhas ausências me dando todo apoio e me ajudando diretamente nesta conquista.

Aos meus avós: Maria Salete de Oliveira Fonseca e Lauro de Oliveira Fonseca, por sempre me apoiar com recursos e palavras de estímulo.

E por fim, aos meus amigos, que de forma direta ou indireta, me ajudaram a concluir esse sonho.

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 mecânicos, ligas metálicas com efeito de memória de forma (LMF) NiTi 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, módulo elástico, força, 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 das LMFs e dos compósitos com ligas de NiTi embutidas, os quais apresentaram variação positiva no módulo elástico ao serem aquecidos acima da temperatura de transformação das lâminas de NiTi.

Palavras-chave: Protótipo, NiTi, Termomecânico, Ensaios

ABSTRACT

With the need to know new properties of the materials, a prototype was developed in the mechanical design laboratory of the Federal Rural Semi-Arid University, with the objective of enabling the electrothermomechanical characterization of mechanical materials, metal alloys with memory effect of form (LMF) NiTi 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, elastic modulus, ductile / fragile transition of some elements. This prototype was fabricated with an adaptation to the universal machine of the EMIC type, in order to join the device developed by the test machine, transforming into a thermomechanical system. With this system, it was possible to verify the activation capacity of the LMFs and composites with NiTi alloys, which showed a positive variation in the elastic modulus when heated above the transformation temperature of the NiTi slides.

Keywords: Prototype, NiTi, Thermomechanical, Tests

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Efeito de memória de forma em ligas metálicas.....	14
Figura 2- Ensaio eletrotérmico com LMF.....	16
Figura 3- Resistência elet. em função da temperatura para a fita Ni-Ti equiatômica....	16
Figura 4- Ensaio DSC.....	17
Figura 5- Curva de DSC obtida para a fita da Liga Ni-Ti equiatômica.....	18
Figura 6- Variação do módulo elástico em função da temperatura.....	19
Figura 7- Plataforma SMART.....	20
Figura 8- Ensaio com dispositivo SMART- Plus.....	21
Figura 9- Funcionamento de uma pastilha termoelétrica.....	22
Figura 10- Configuração do banho térmico-regulável.....	23
Figura 11- Modelagem do sistema termomecânico.....	24
Figura 12- Modelagem do sistema termomecânico.1.....	25
Figura 13- Modelagem do sistema termomecânico.2.....	25
Figura 14- Peças fabricadas do banho térmico.....	26
Figura 15- Modelagem da cuba e válvula de registro.....	27
Figura 16- Banho térmico- regulável conectado a máquina de ensaios.....	28
Figura 17- Estabilização das temperaturas durante os ensaios.....	29
Figura 18- Configuração do ensaio eletrotérmico.....	30
Figura 19- Unidade de aquisição de dados LXI.....	30
Figura 20- Amostras dos compósitos GFRP/NITI.....	31
Figura 21- Ensaio eletrotérmico (Fio NITI).....	32
Figura 22- Ensaio eletrotérmico (Lâmina NITI).....	33
Figura 23- Caracterização termomecânica dos compósitos GFRP/NITI.....	34

TABELAS

Tabela 1- Temperatura de transformação de fase das ligas LMF (Fio NiTi).....	33
Tabela 2- Temperatura de transformação de fase das ligas LMF (Lâmina NiTi- equiatômica).....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LMF	Ligas Com Memória de Forma
NITI	Níquel- Titânio
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
CAD/CAM	Computer-aided design/ Computer-aided manufacturing
SMA	Shape Memory Alloys
EMF	Efeito memória de forma
DMA	Termomecanometria dinâmica
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
TMA	Análise termomecânica
DTA	Análise térmica diferencial
RET	Ensaio eletrotérmico (Resistência/Temperatura)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	122
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1. LIGAS COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA, MEDIDAS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA E FLUXO DE CALOR.....	15
2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TERMOMECÂNICA DAS LIGAS COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA.....	19
2.3. BANHO TÉRMICO.....	20
3. METODOLOGIA	24
3.1. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.2. FABRICAÇÃO DAS PEÇAS.....	27
3.3. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO.....	28
3.4. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO.....	29
3.5. CONTROLE DE TEMPERATURA.....	29
3.6. CARACTERIZAÇÃO ELETROTÉRMICA DAS LIGAS NITI	30
3.7. CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DAS LIGAS NITI	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5. CONCLUSÕES	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

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. Segundo (Rômulo, 2010) em sua dissertação, através do banho térmico consegue-se a caracterização das temperaturas de transformação de fase e a histerese térmica de ligas com memória de forma (LMF) que trabalham em uma faixa específica de temperatura, determinada de acordo com a limitação do sistema em trabalho.

Materiais inteligentes são elementos capazes de reduzir custos e otimizar 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 (Os Materiais Inteligentes e Suas Aplicações, 2013).

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 termoregulável, 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 metálicos, ligas e compósitos ativos à base de NITI e determinar as propriedades, como: variação do módulo de elasticidade dos matérias em função da temperatura, análise das fases martensitas e austenitas das ligas de NITI e resistência elétrica.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

- Projetar e fabricar um protótipo com o objetivo de possibilitar a caracterização termomecânica em diferentes materiais, pela variação da temperatura e através de ensaios de tração e flexão, utilizando como equipamentos auxiliares, uma máquina de ensaio universal, uma fonte de corrente contínua e uma sistema de aquisição de dados.

1.1.2. Objetivos Específicos

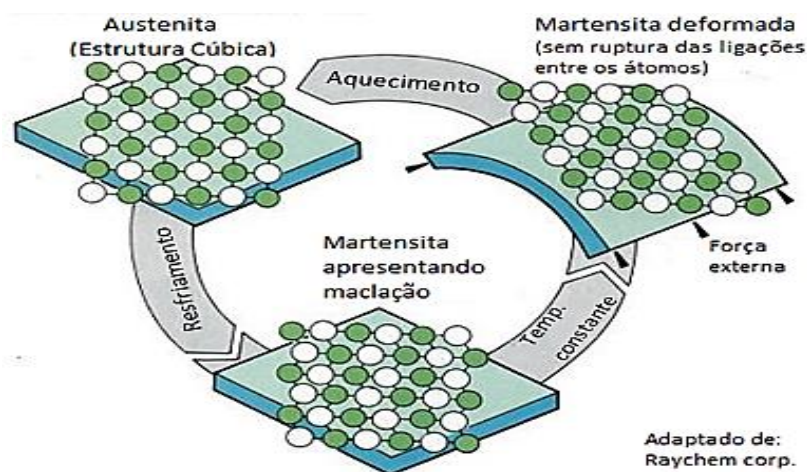
1. Projetar o equipamento inicialmente em um software CAD/CAM.
2. Fabricar o protótipo com as ferramentas disponíveis do laboratório de engenharia mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.
3. Promover a caracterização mecânica de ligas e compósitos.
4. Promover a caracterização termomecânica e eletrotérmica em diferentes materiais, para o trabalho, especificamente com ligas com efeito de memória de forma.
5. Realizar análises das amostras ensaiadas, conferindo os resultados de acordo com a literatura indicada, a fim de conferir e garantir o uso adequado do equipamento e sua viabilidade quanto aos ensaios.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. LIGAS COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA, MEDIDAS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA E FLUXO DE CALOR

As ligas com memória de forma (do inglês *Shape Memory Alloys – SMA*), são materiais metálicos que, mesmo deformados plasticamente, são capazes de recuperar a geometria original (ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação) através ativação térmica ou induzida pela aplicação de uma corrente elétrica. Este fenômeno ocorre devido as transformações de fases desenvolvidas no material. Atualmente existe uma variedade muito grande de materiais que apresentam o Efeito Memória de Forma (EMF), porém, os que despertam interesse comercial são aqueles que apresentam recuperação de forma significativa (entre 3 e 6 %), ou que oferecerem considerável força de restituição ao se restringir à recuperação de sua forma originada após a imposição de temperatura. Ultimamente, os materiais que se encaixam nestes aspectos são as ligas metálicas do sistema Ni-Ti e algumas ligas de cobre dos sistemas Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni. Na Figura 1, está representada esquematicamente como ocorre esse fenômeno de memória de forma, citado anteriormente.

Figura 1- Demonstração do efeito de memória de forma em ligas metálicas



Fonte: (MARTENDA, 2018)

A caracterização das ligas com efeito de memória de forma consiste basicamente em determinar os parâmetros que tem uma relação direta com o fenômeno e com a deformação correspondente do próprio material em ensaio, verificando assim, alterações na resistência

elétrica do material, a absorção ou liberação de energia térmica e as alterações da rigidez (módulo de elasticidade). A partir destas características e dos dados apresentados nos ensaios é possível determinar as temperaturas críticas de transformação de fase e histerese em temperatura de uma LMF. As transformações martensíticas e austeníticas das LMF podem ser estudadas a partir das curvas do comportamento de variações de algumas propriedades físicas como resistividade elétrica e calor específico em função da temperatura.

Para este tipo de análise, as principais técnicas utilizadas são através de dispositivos específicos, como calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise térmica diferencial (DTA), análise termomecânica (TMA) e mais recentemente a termomecanometria dinâmica (DMA) (CHANG e WU, 2008). As técnicas de análise térmica DSC e DTA detectam tanto a transformação martensítica, que é exotérmica (acompanhada por liberação de calor), quanto à transformação austenítica, que é endotérmica (acompanhada por absorção de calor). As temperaturas críticas da transformação são:

Mi → Temperatura de início de transformação martensítica direta (inglês Ms);

Mf → Temperatura de final da transformação martensítica direta;

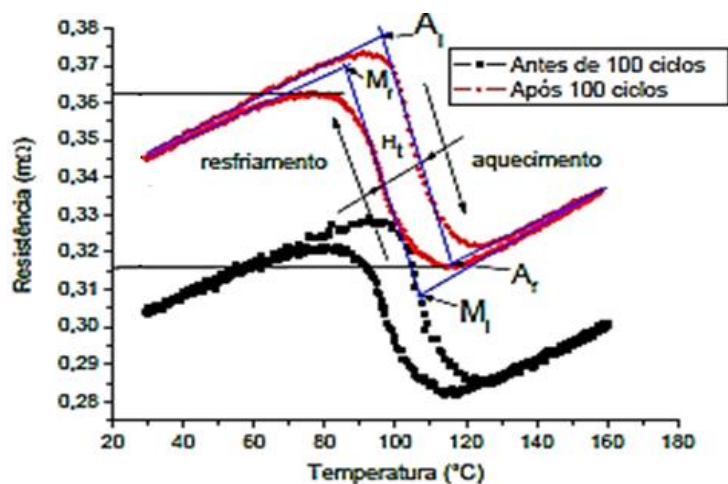
Ai → Temperatura de início da transformação martensítica reversa (inglês As);

Af → Temperatura de final da transformação martensítica reversa;

Ht → Histerese da transformação.

Na Figura 2 pode-se verificar uma curva de um ensaio eletrotérmico, onde conseguiu-se obter a variação da resistência elétrica em função da temperatura para uma amostra de LMF . (REIS *et al.*, 2006). Nesse mesmo gráfico, podem-se visualizar as temperaturas iniciais e finais das transformações de fases da liga LMF e uma histerese em temperatura, medida a 50% da transformação, conforme se apresenta na Figura 2. Em geral, a histerese em temperatura das transformações martensíticas termoelásticas variam entre 5°C e 50°C dependendo do tipo de LMF e do seu processamento termomecânico. (REIS *et al.*, 2006).

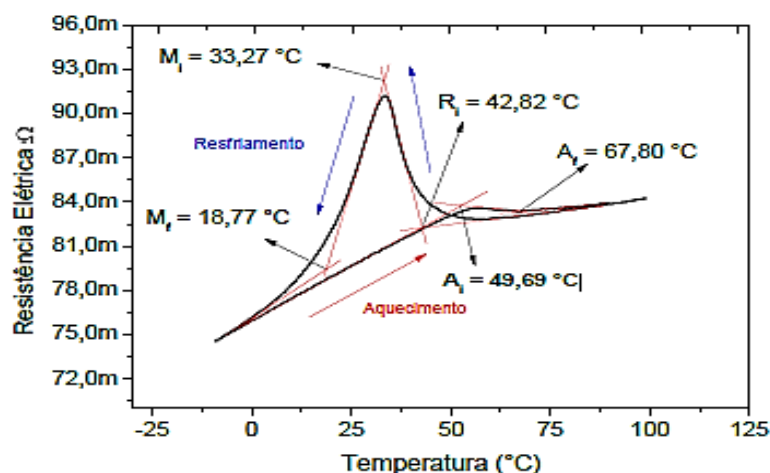
Figura 2- Ensaio eletrotérmico, demonstrando as temperaturas de transformação de fase das ligas LMF e da histerese da transformação (H_t) durante um ciclo térmico de resfriamento e aquecimento de uma amostra de LMF.



Fonte: (REIS *et al.*, 2006)

Outro ensaio que também podemos citar é o ensaio realizado por (Rômulo, 2010), onde o mesmo realizou ensaios eletrotérmicos e de DSC em lâminas de NiTi. Para determinar as características elétricas e as transformações de fase da liga, o autor utilizou os mesmos parâmetros indicados por (REIS *et al.*, 2006). Portanto, Na Figura 3, podemos ver o ensaio realizado com as lâminas de NiTi equiatômicas. Percebe-se que as curvas apresentam as mesmas configurações da Figura 2, com transformações (A_i , A_f , M_i e M_f), demonstrando a propriedade de memória de forma e provando a viabilidade do ensaio.

Figura 3- Resistência elétrica em função da temperatura para a fita Ni-Ti equiatômica

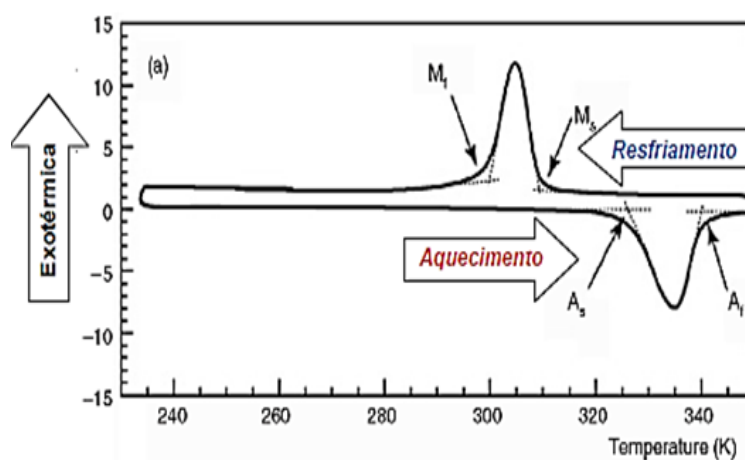


Fonte: (Rômulo, 2010)

Já na Figura 4 apresenta-se outro método de análise térmica, exemplificando uma curva típica de calorimetria diferencial de varredura (DSC) utilizada também na determinação das temperaturas de transformação de fase de duas ligas tratadas termicamente. A técnica de DSC é uma análise térmica que registra o fluxo de energia calorífica associado às transformações de fases nos materiais em função da temperatura. Este ensaio é bastante difundido e aplicado na caracterização térmica de LMF.

Assim como no ensaio eletrotérmico, exemplificado na Figura 2 e 3, durante o resfriamento se verifica um pico exotérmico característico da transformação martensítica, onde é possível se determinar os valores de temperatura inicial (M_i) e final (M_f) da transformação martensítica. E durante o aquecimento observa-se um pico endotérmico característico da transformação austenítica, onde é possível obter os valores das temperaturas de início (A_i) e final (A_f) da transformação austenítica (NAGAI e OISHI, 2006; CHANG e WU, 2008; SUN, HUANG e CHEAH, 2010).

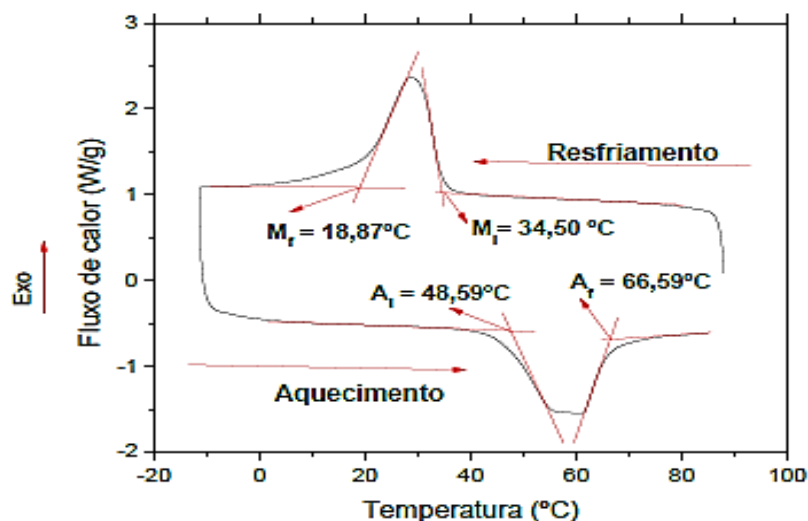
Figura 4- Caracterização de uma liga LMF através do ensaio DSC



Fonte: (NAGAI e OISHI, 2006)

Como foi falado anteriormente, segundo (Rômulo, 2010) também foi possível realizar análises térmicas por DSC. Este ensaio desenvolvido foi útil para se obter uma comparação com os valores de transformação de fase das ligas apresentados pelos ensaios eletrotérmicos. Na Figura 5, mostra as curvas deste ensaio.

Figura 5- Curva de DSC obtida para a fita da Liga Ni-Ti equiatômica



Fonte: (Rômulo, 2010)

Como podemos perceber, nas curvas das Figuras 3 e 5, os valores para (A_i , A_f , M_i e M_f) são praticamente invariáveis, diferenciando apenas por pequenos erros gerados pelo próprio equipamento, validando dessa forma o equipamento de medição desenvolvido para a sua proposta de dissertação quanto à aplicação e obtenção das temperaturas de transformação de fase em LMF.

Vale lembrar que as temperaturas de transformação nas curvas apresentadas nas Figuras 2, 3, 4 e 5 são determinadas através da técnica do cruzamento das tangentes, que é uma técnica recomendada pela Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria (ABRATEC, 2007).

Estes ensaios realizados por (Rômulo, 2010) servirão de base e comparação para o desenvolvimento deste trabalho.

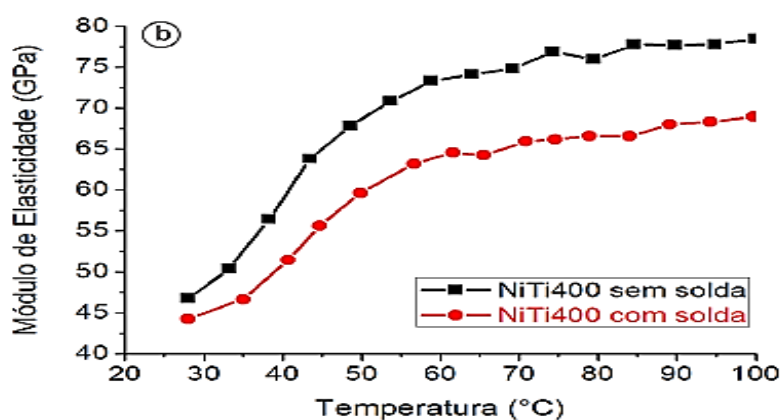
2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TERMOMECAÂNICA DAS LIGAS COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

A caracterização mecânica é um dos ensaios iniciais quando se deseja caracterizar as ligas LMF termomecanicamente, pois nesta análise um dos principais objetivos é conhecer o comportamento do módulo elástico diante de um intervalo de temperatura. Dessa forma,

realizam-se ensaios de tração ou compressão, para determinar a rigidez do material na temperatura ambiente, a fim de comparar com os resultados após os ensaios termomecânicos.

Outra forma de detectar o módulo elástico, só que nesse caso, de forma direta é através de ensaios termomecânicos, onde a principal ferramenta utilizada é o analisador dinâmico mecânico (DMA), neste ensaio é possível conhecer o comportamento do módulo elástico sem ensaios mecânicos prévios. No ensaio DMA a amostra é submetida a uma tensão senoidal e esta responde com uma deformação também senoidal, mas com o ângulo fora de fase. Esses dados, após serem processados, podem ser expressos em: módulo elástico, módulo de cisalhamento, módulo compliança e tangente de perda. Na Figura 6, encontram-se duas curvas do desenvolvimento do módulo elástico em função da temperatura para duas ligas com memória de forma. Segundo (Amorim et al. 2015), na análise com os dois fios, um com solda e outro sem solda, o comportamento do módulo elástico é positivo, e ocorre um pico de elevação no momento de transformação de fase das ligas, entre os pontos 30°C e 40°C.

Figura 6- Variação de módulo de elasticidade em função da temperatura



Fonte: (AMORIM et al., 2015)

Porém existem outras formas de analisar esse comportamento apresentado pelo módulo elástico, inclusive alguns projetos já foram lançados, garantindo que é possível obter resultados satisfatórios sem utilizar o analisador dinâmico mecânico (DMA), como veremos adiante.

2.3. BANHO TÉRMICO

A caracterização através do banho térmico tem a finalidade de conhecer várias características mecânicas dos materiais, como: resistência elétrica, tensão elétrica, módulo elástico e entre outros. Alguns trabalhos desenvolvidos utilizam o banho térmico para

determinar resistência elétrica em função da temperatura. Como foi o caso do trabalho desenvolvido por (REIS et al. 2006). Em seu trabalho o mesmo desenvolveu uma plataforma experimental de teste capaz de realizar medição da resistência elétrica em função da temperatura em amostras de ligas com memória de forma, na faixa de -10 a 200 °C, denominada Sistema de Medição de Resistência Elétrica em função da Temperatura (SMRT). Nesse sistema o autor conseguiu obter curvas R-T satisfatórias para a determinação das temperaturas críticas de transformação martensítica e austenítica, a única dificuldade encontrada foi trabalhar com baixas temperaturas, nesse ponto o sistema não apresentava boa eficiência..

Nesse trabalho (REIS et al. 2006) podemos encontrar 3 problemas interessantes que poderiam ser melhorados com outros projetos. O primeiro foi a baixa eficiência do sistema em temperaturas inferiores a 0°C , o segundo problema é justamente o custo de aquisição, pois a constituição desse sistema requer alguns equipamentos específicos, que apresentam um alto custo. E o terceiro é que este equipamento se resume somente a uma propriedade específica dos materiais, a resistência elétrica. Na Figura 7, podemos ver uma ilustração desse sistema, o qual é constituído pelo banho térmico (1), uma fonte de potência CC (2), um sistema de aquisição de dados com placa de interface GPIB (3) e um computador com programa de visualização dos dados coletados (4).

Figura 7- Plataforma experimental de medição da resistência elétrica em função da temperatura em amostras de LMF (SMRT).

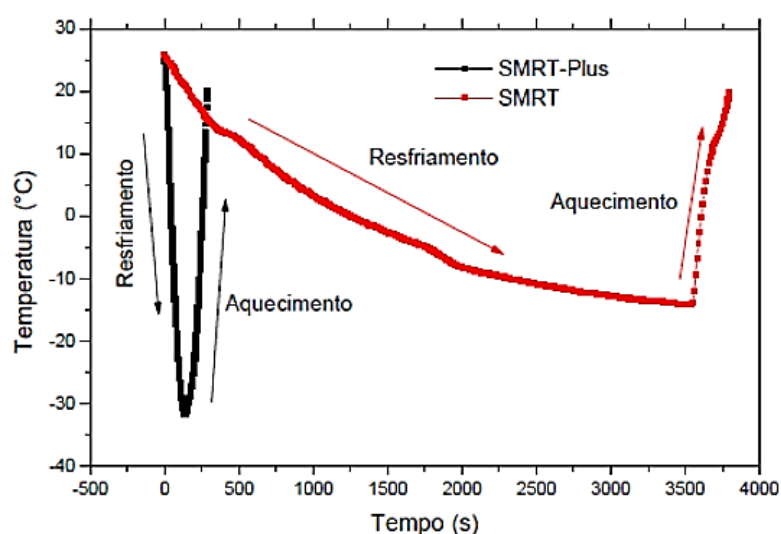


Fonte: (REIS et al., 2006)

Já em 2007 um novo sistema de variação da temperatura que faz uso de uma pastilha termoeletrônica, baseada no Efeito Peltier (ROWE, 2005), foi utilizado como dispositivo de

aquecimento e resfriamento, para realizar os mesmos ensaios, esse sistema ganhou o nome de SMRT-Plus (REIS, 2008a; REIS *et al.*, 2008b; REIS *et al.*, 2008c). Com esse sistema foi possível melhorar a eficiência dos ensaios nas temperaturas inferiores a 0°C. No sistema anterior SMART, um ciclo completo entre -10 °C e 30 °C dura aproximadamente 1 hora enquanto no SMRT-Plus essa mesma ciclagem pode ser feita em apenas 5 minutos. Na Figura 8, podemos ver a evolução desse sistema quanto a esse ponto.

Figura 8- Curvas da temperatura em função do tempo comparativas entre o SMRT-Plus e o SMRT.



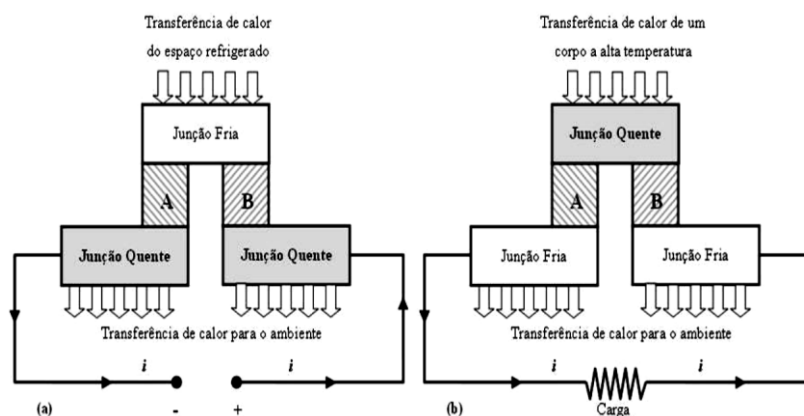
Fonte: (REIS *et al.* 2008c)

Segundo Van Wylen *et al* (2003), uma Pastilha Termoelétrica é um refrigerador termoelétrico no qual é possível utilizar diretamente a energia elétrica para promover a refrigeração, evitando os custos com o compressor, condensador, evaporador e tubulações, que são componentes necessários em um refrigerador que funciona por compressão de vapor. Além de refrigerador, essa pastilha pode funcionar como um gerador termoelétrico. Todo esse sistema é baseado no Efeito Peltier (também conhecido como força eletromotriz de Peltier) onde ocorre a produção de um gradiente de temperatura na junção de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado Danvic (2018).

Na Figura 9, ilustra como ocorre o funcionamento da pastilha termoelétrica baseada no Efeito Peltier. Quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada aos terminais (+ e -), a temperatura da junção localizada no espaço refrigerado diminui (junta fria T_c) e a temperatura da outra junção (junta quente T_h) aumenta. Desta forma o calor é transferido do espaço

refrigerado para a junção fria e da junção quente para o meio ambiente. Já o sistema mostrado na Figura 9 (b), representa uma pastilha termoeétrica utilizada como um gerador de potência, onde o espaço refrigerado foi trocado por um corpo de temperatura elevada e nos terminais (+ e -) foi colocada uma carga. Dessa forma, a partir de uma diferença de temperatura pode ser gerada uma quantidade de energia elétrica diretamente sobre a carga.

Figura 9 - Princípio de funcionamento de uma pastilha termoeétrica. (a) Refrigerador termoeétrico. (b) Gerador termoeétrico



Fonte: (VAN WYLEN, S. e BORGNAKKE, 2003)

Dessa forma, como podemos ver, existem inúmeras aplicações para se conhecer as propriedades mecânicas, porém o que podemos perceber é que sempre nesses trabalhos o autor se resume apenas a detectar uma propriedade específica do material, limitando o próprio dispositivo desenvolvido. Com essa problemática, foi desenvolvido um protótipo denominado de banho térmico-regulável, com a intenção de adaptar a ideia do banho térmico a uma máquina de ensaios universais. Com essa adaptação, imaginava-se obter novas propriedades relacionadas aos ensaios mecânicos e termomecânicos.

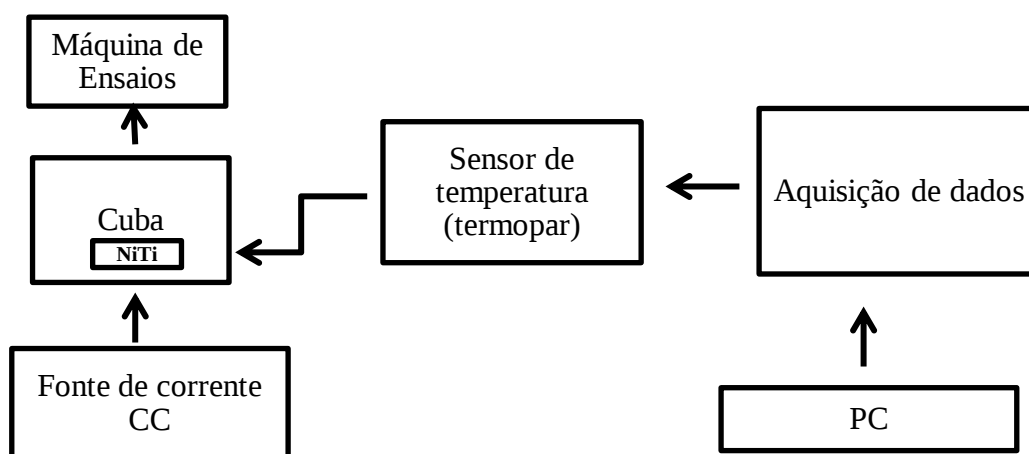
Com o projeto elaborado, e dimensionado de acordo com as limitações da máquina de ensaios, conseguiu-se fabricar o banho térmico-regulável, onde o mesmo foi capaz de determinar várias propriedades, entre elas: resistência elétrica, tensão elétrica, módulo de elasticidade, temperatura de transformação de fase e ainda abriu margem para uma possível análise dúctil-frágil de ligas mecânicas, pelo fato de apresentar uma configuração ideal para este ensaio. Na proposta desenvolvida, trabalhou-se com duas propriedades: rigidez do material (módulo elástico) e resistência elétrica.

3. METODOLOGIA

Nesta seção abordaremos o caso específico para o qual iremos trabalhar, bem como os meios utilizados para chegar aos resultados esperados.

Para desenvolver esta pesquisa, utilizaram-se alguns equipamentos disponíveis no laboratório de produção mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e precisou-se tanto da licença como da utilização do software Siemens NX, como ferramenta inicial para o desenvolvimento do projeto. Este trabalho tem como foco, projetar, fabricar e validar um sistema termomecânico, com objetivo de realizar caracterizações mecânicas, termomecânicas e eletrotérmicas em qualquer tipo de material mecânico. Como parâmetro variável, utilizou-se: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Força (N) e número de fitas embutidas, esta última, teve um papel muito importante nas caracterizações dos compósitos. Logo abaixo, na Figura 10, pode-se ver a configuração do sistema termomecânico desenvolvido.

Figura 10. Configuração do banho térmico-regulável



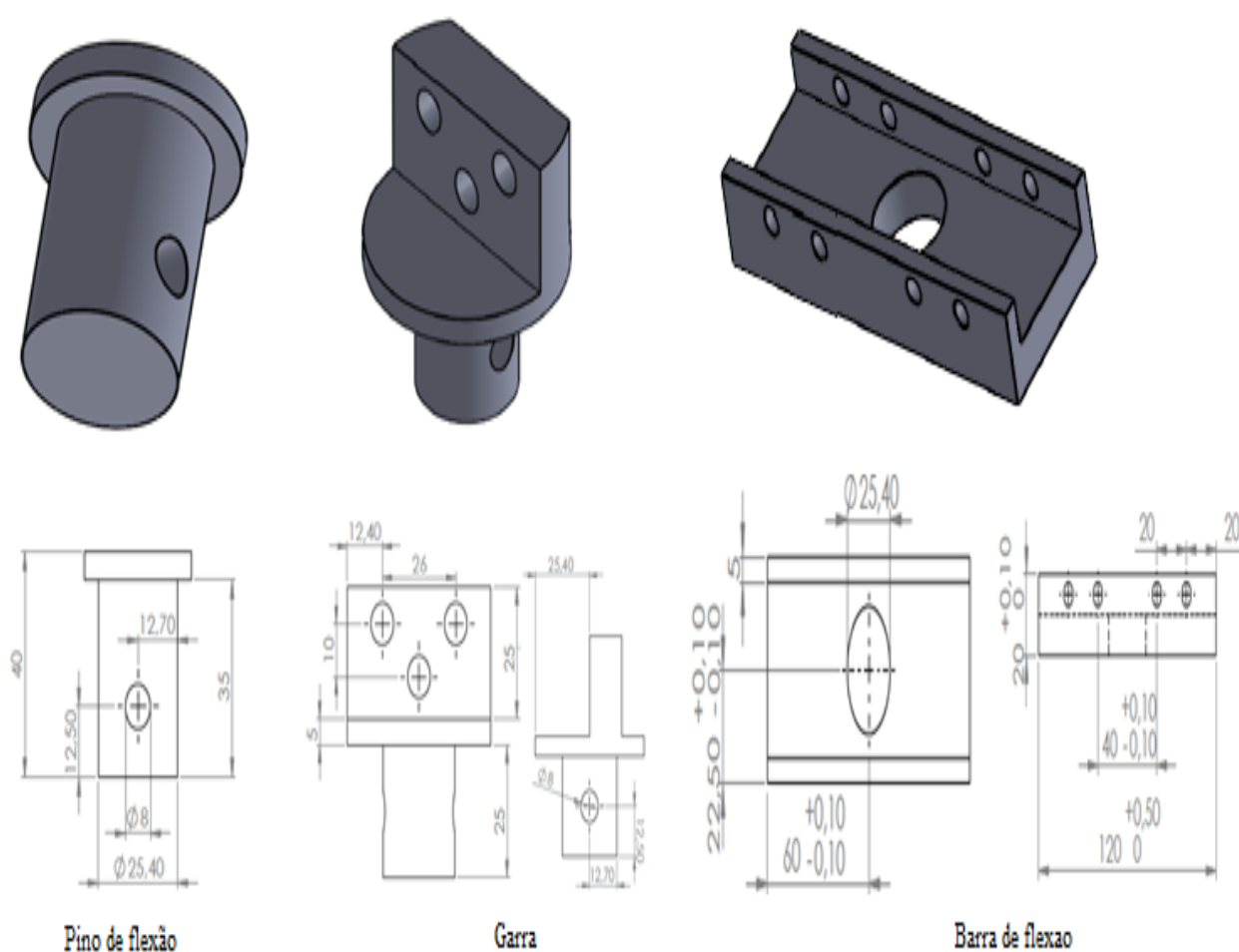
Fonte: Autoria própria

3.1. MATERIAIS E MÉTODOS

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

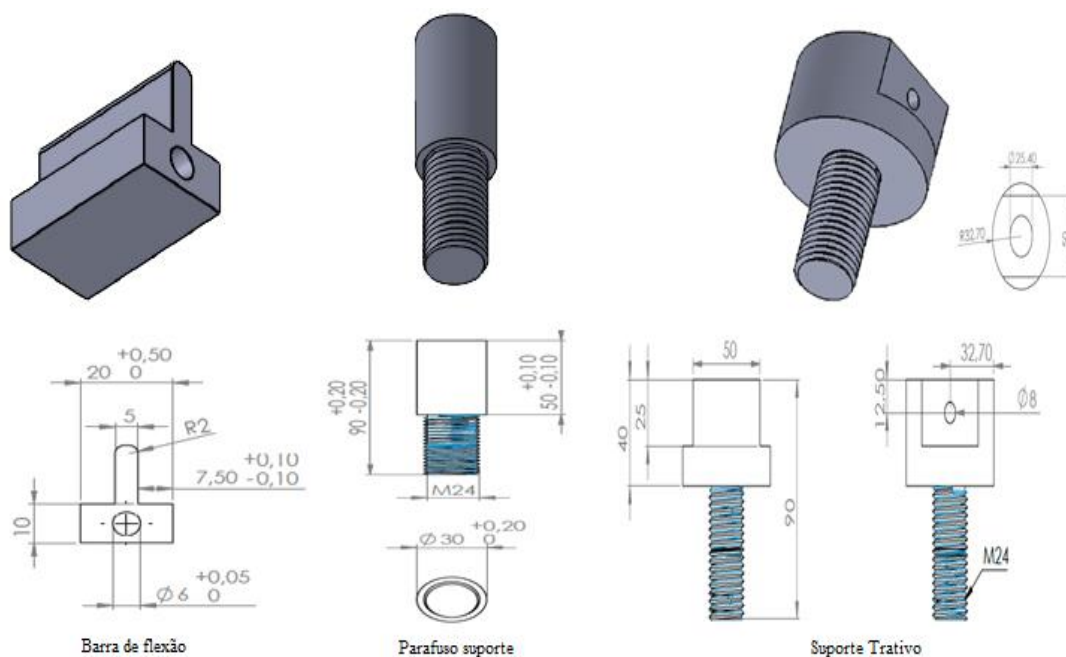
tração, flexão e resistência dois pontos. O banho térmico regulável, como relatado anteriormente, possui uma adaptação desenvolvida para realizar ensaios em máquinas universais do tipo Emic, dessa forma, para atender todos os critérios do sistema, foi necessário fabricar algumas peças, tais como: 2 suportes (flexão e tração), 2 garras (fixação das amostras), 1 cuba, 1 parafuso (encaixe entre a máquina e o banho) e 1 barra (apoio das amostras nos ensaios de flexão). Logo abaixo, nas Figuras 11, 12 e 13, podemos ver algumas peças do sistema de banho térmico modeladas pelo software Siemens NX.

Figura 11- Modelagem do sistema termomecânico através de software CAD/CAM



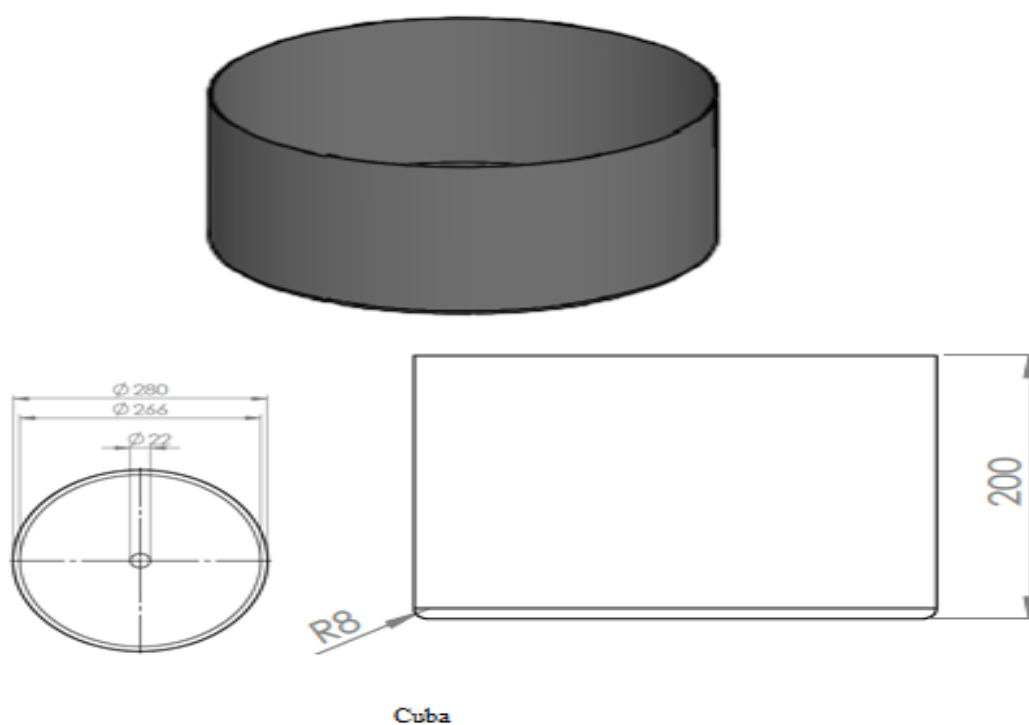
Fonte: Autoria própria

Figura 12- Modelagem do sistema termomecânico através de software CAD/CAM.1



Fonte: Autoria própria

Figura 13- Modelagem do sistema termomecânico através de software CAD/CAM.2



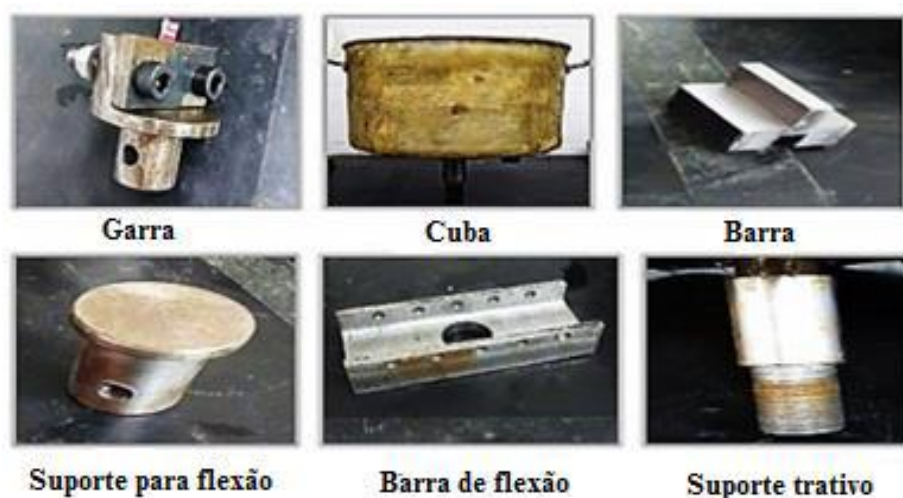
Fonte: Autoria própria

Já para compor o sistema de refrigeração e aquecimento do banho térmico, utilizaram-se alguns materiais disponibilizados pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido, tais como: 1 compressor, 1 ventoinha, 1 condensador, 1 válvula de registro, 1 termopar, 1 Mergulhão e 1 serpentina.

3.2. 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 Figura. 14 podemos visualizar algumas imagens do protótipo fabricado.

Figura 14- Peças para o banho térmico, fabricadas pelo processo de usinagem.



Fonte: Autoria própria

A Princípio, encontraram-se muitos problemas relacionados a fixação das amostras. como a intenção seria trabalhar com fios e lâminas, a superfície das garras de fixação deveriam ser totalmente polidas e planas em toda sua extensão. Sabendo desse detalhe, foi sugerido algumas ideias, a fim de solucionar este problema. A primeira tentativa foi lixar as superfícies de contato. Neste primeiro teste, conseguiu-se deixar as superfícies planas, porém os fios e as lâminas não estavam se rompendo no comprimento útil, pois o esforço fornecido durante a

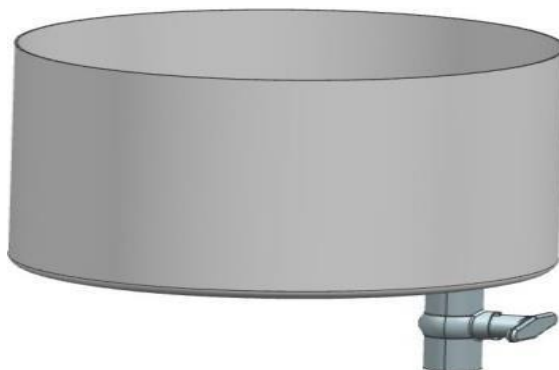
fixação das ligas estavam deformando as amostras, deixando-as frágeis e fáceis de se romper dentro das garras. Portanto, para solucionar este problema, utilizou pequenas chapas de alumínio para servir de suporte no momento da fixação. Essas chapas foram encaixadas nas garras de tração e serviram para aliviar a tensão de aperto das ligas e eliminar a ruptura repentina das ligas LMF.

3.3. 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 15, pode-se ver a cuba, local onde foi depositado o óleo de silicone. Nessa ilustração ainda podemos identificar uma válvula controladora de vazão (válvula de registro), a qual foi utilizada para esvaziar o reservatório nas pausas dos ensaios.

Figura 15- Projeto da Cuba e válvula registro no software Siemens NX

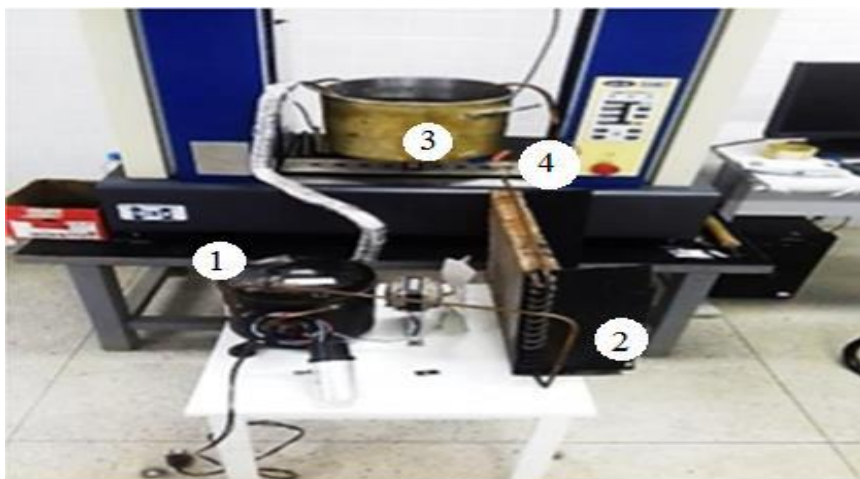


Fonte: Autoria própria

3.4. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO

Para a realização da caracterização termomecânica das ligas, foi necessário associar ao projeto da cuba, um sistema de refrigeração e aquecimento, o qual pode ser visualizado na Figura 16. 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 ate $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Já o sistema de aquecimento é composto apenas por um aquecedor portátil, no qual é responsável pelo aquecimento das amostras ate $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. A união desses sistemas tem como objetivo ativar as amostras para coletar dados das suas propriedades mecânicas e elétricas.

Figura 16- Banho térmico- regulável conectado a máquina de ensaios universal



Fonte: autoria própria

3.5. CONTROLE DE 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 17, 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 estabilizando 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 17- Estabilização das temperaturas no controlador e na unidade de aquisição



Fonte: Autoria própria

Na Figura 17, ocorre um pequeno erro na estabilização das temperaturas entre o controlador de temperatura e o sistema de aquisição de dados. Este erro pode ser explicado pela sensibilidade do termopar do sistema de aquisição de dados, já que o mesmo se encontrava exposto e livre no banho térmico. Dessa forma, uma pequena vibração, ate mesmo provocada pela agitação do fluido durante o aquecimento poderia provocar alterações significantes na temperatura. Outro ponto relevante seria a inercia térmica durante o aquecimento dos componentes, onde as temperaturas teriam dificuldades de se estabilizarem. Portanto, o intervalo de temperatura mais próximo que se conseguiu chegar foi 72,3- 70,1 °C.

3.6. 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, utilizam-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 18, pode-se ver a configuração utilizada para realizar esses ensaios.

Figura 18- Lâmina de NiTi conectada a fonte elétrica e imersa no banho térmico



Fonte: Autoria própria

No ensaio da Figura 18, para podermos transferir a corrente elétrica da fonte para as ligas LMF, foi preciso utilizar eletrodos de aço carbono laminados. Esses eletrodos foram fixados nas lâminas e nos fios por soldas, utilizando a máquina de soldar pontos do tipo Metal Vander ortodonológica.

Ainda nesta etapa, utilizou uma unidade de aquisição de dados LXI, Figura 19, o mesmo possui até 11 sinais de entrada diferentes, incluindo temperatura com termopares, termorresistências (RTDs) e termoresistores, tensão ou corrente CC/CA, resistência a 2 ou 4 fios, frequência e período. 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°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 19- Unidade de aquisição de dados LXI



Fonte: Autoria própria

3.7. 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 20, 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 pontos o sistema de controle deverá manter constante a temperatura, para realizar os ensaios mecânicos.

Figura 20- Configuração das amostras - compósitos GFRP/NITI (Glass Fiber Reinforced Polymer) para realização dos ensaios de tração e flexão



Método de Ensaio para Tração e flexão



Cuba conectada a máquina de ensaios

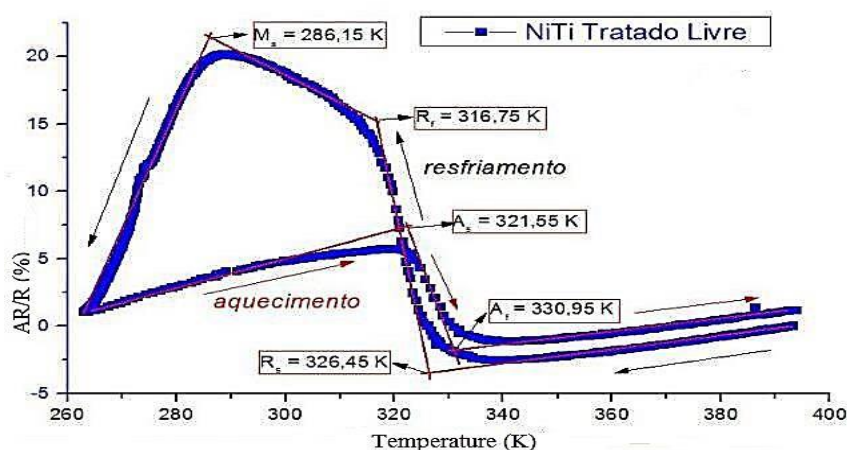
Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, trataremos dos resultados evidenciados pelos ensaios e mostraremos a viabilidade na utilização da máquina térmica regulável.

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 21 e 22.

Figura 21- Ensaio eletrotérmico do fio NITI com memória de forma- Ensaio RET



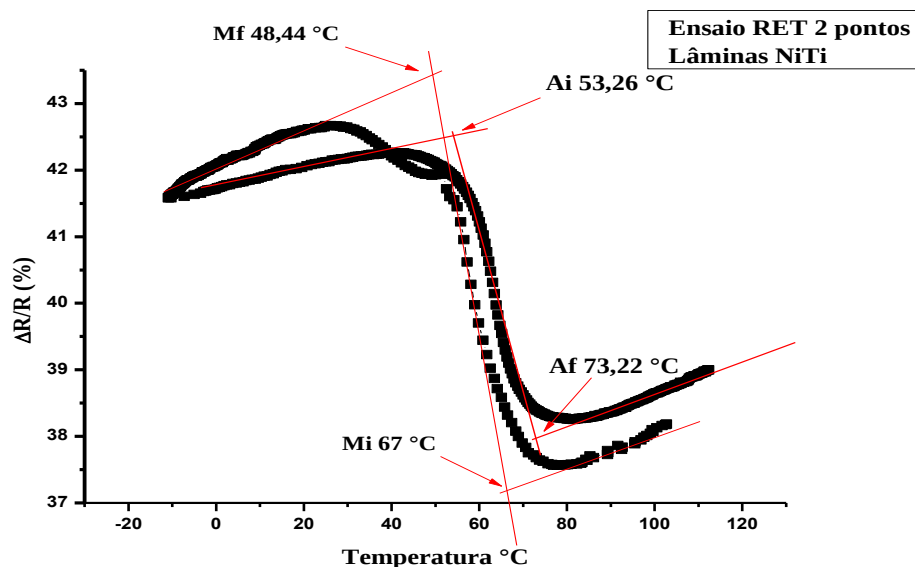
Fonte: Autoria própria

Na tabela 1, podemos ver as temperaturas de transformação de fase em detalhes para o fio de NITI tratado termicamente durante o ensaio eletrotérmico do tipo resistência dois pontos.

Tabela 1- Temperatura de transformação de fase das ligas LMF (Fio NiTi)

Temp. Trans. de Fase	Ensaio
Mi	13 °C
Mf	53,3 °C
Ai	48,4 °C
Af	57,3 °C

Fonte: Autoria própria

Figura 22- Caracterização eletrotérmica da lâmina NITI – Ensaio RET

Fonte: Autoria Própria

Na curva apresentada da Figura 22, podemos perceber o comportamento da fita semelhante aos do fio de NiTi, esse fato é evidenciado pela composição e pela propriedade de memória de forma que os mesmos apresentam.

Para compararmos os resultados obtidos pelos ensaios, utilizou-se a dissertação (Rômulo, 2010), onde o mesmo realizou ensaios eletrotérmicos e de DSC em lâminas de NiTi equiatômicas, assim como relatado anteriormente nas Figuras 3 e 5. Na tabela 2, podemos ver a comparação entre os dois resultados obtidos pelos ensaios eletrotérmicos (resistência/ temperatura).

Tabela 2- Temperatura de transformação de fase das ligas LMF (Lâmina NiTi- equiatômica)

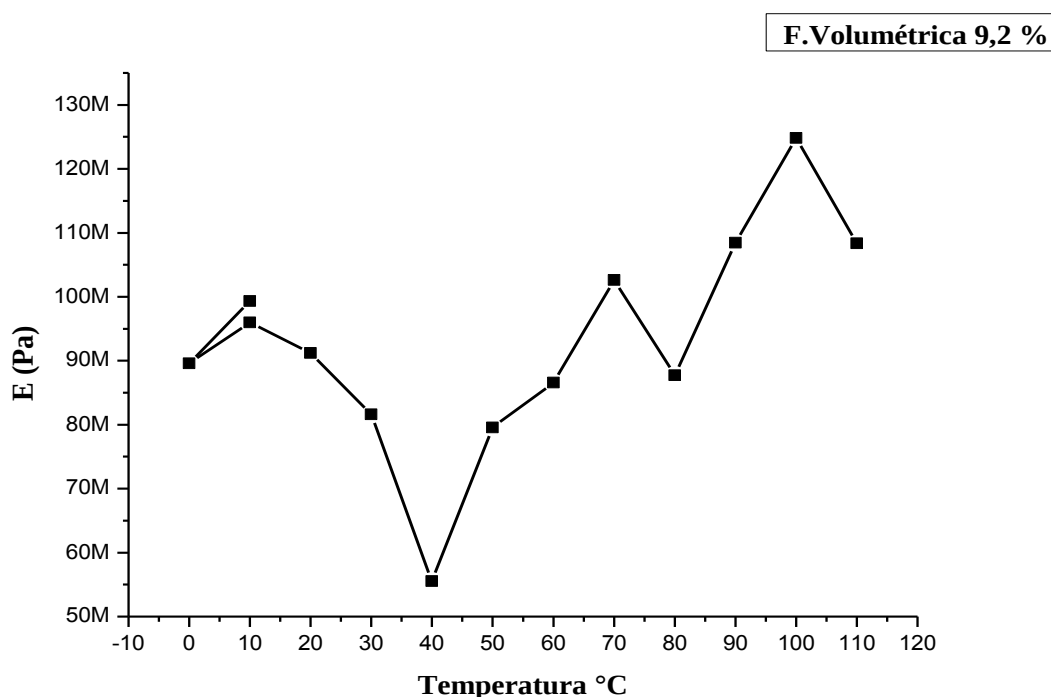
Temp. Trans. de Fase	Ensaio (Rômulo, 2010)- RET	Ensaio (Rômulo, 2010)- DSC	Ensaio Atual
Mi	33,27 °C	34,50 °C	67 °C
Mf	18,77 °C	18,87 °C	48,44 °C
Ai	49,69 °C	48,59 °C	53,26 °C
Af	67,80 °C	66,59 °C	73,22 °C

Fonte: Autoria própria

A diferença entre os valores de temperaturas obtidos nas fases martensíticas com os resultados de (Rômulo, 2010) podem ser explicadas pelas condições adversas ocorridas durante o ensaio, como: troca de calor com o meio externo, vibração do sensor de temperatura (termopar), fazendo a mudança repentina das temperaturas e desregulando assim o ensaio. Já nas temperaturas austeníticas, conseguiu-se chegar bem próximo dos valores esperados.

Outro ponto importante, agora nos ensaios termomecânicos, foi a eficácia das análises realizadas pelos ensaios de 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 de compósitos embutidos com ligas de NITI, Figura 20, 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 na figura 23.

Figura 23- Caracterização termomecânica dos compósitos GFRP/NITI



Fonte: Autoria própria

Esta Figura 23 segue coerentemente a fonte citada, onde o módulo elástico aumenta progressivamente no intervalo 40 – 50 $^{\circ}\text{C}$, justamente onde ocorre a transformação de fase da

liga NITI de Mf para Ai. As demais amostras não conseguiram obter o mesmo comportamento, pois a fração molecular de NiTi inserida nos compósitos não foi suficiente para ativar o efeito de memória de forma. Para solucionar este problema com as mesmas amostras, teríamos que encontrar alguma forma de aumentar a fração molecular. Uma das formas seria lixar as amostras, reduzindo o volume de fibra de vidro dos compósitos GFRP/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 flexível e “borrachoso”.

5. CONCLUSÕES

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 ou o próprio DSC. A grande utilidade deste equipamento forneceu ainda auxílio em pesquisas entre professores e alunos da Universidade Federal Rural do Semi- Árido, onde foi possível desenvolver análises térmicas de lâminas NiTi ortodônticas, e realizar o controle das temperaturas de transformações de fases das ligas NiTi tratadas por betatização. 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.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRATEC. **Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria**, 2007. Disponível em: <http://abratec1.tempsite.ws/abratec/download/anal_termica.zip>. Acesso em: 22 jun. 2010

AMORIM, Fernando Andrade et al. Avaliação das Propriedades Termomecânicas de Fios de Liga com Memória de Forma NiTi Soldados por Pulsos de Micro TIG. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.423-433, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2004.09>.

CHANG, S. H.; WU, S. K. Effect of cooling rate on transformation temperature measurements of Ti50Ni50 alloy by differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis. **Materials Characterization**, v. 59, 2008. 987-990.

DANVIC. **PASTILHA DE EFEITO PELTIER**. Disponível em: <<http://www.danvic.com/produtos/pastilha-de-efeito-peltier/>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

MARTENDA, Caroline. **Demonstração do efeito de memória de forma em ligas metálicas**. Disponível em: <<http://engenheirodemateriais.com.br/2015/06/09/ligas-com-efeito-de-memoria-de-forma-lemf/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

NAGAI, H.; OISHI, R. Shape memory alloys as strain sensors in composites. **Smart Materials and Structures**, v.15, 2006. 493–498.

REIS, Rômulo Pierre Batista dos. **Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoelétrico**. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

REIS, R. P. B. Desenvolvimento de um sistema de ciclagem térmica utilizando o efeito termoelétrico: aplicação a caracterização de ligas com memória de forma. **Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)**, Campina Grande, 2008 a. 33p.

REIS, R.P.B.; DE ARAUJO, C.J.; GOMES, A.A.C.; NETO, J.F.C.; RODRIGUES, L.F.A. Desenvolvimento de um sistema de medição de temperaturas de transformação em ligas

com memória de forma utilizando Pastilha Termoelétrica. **18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos materiais (CBECiMat 2008)**, Porto de Galinhas, 2008b. 1-8

REIS, R.P.B.; DE ARAUJO, C.J.; SILVA, L.A.R.; QUEIROGA, S.L.M. Desenvolvimento de um sistema de medição de resistência elétrica em função da temperatura: aplicação a caracterização de ligas com memória de forma. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2006)**, Recife, 2006. 1-10

REIS, R.P.B.; GOMES, A.A.C.; NETO, J.F.C.; RODRIGUES, L.F.A.; DE ARAÚJO, C.J. Desenvolvimento de um Sistema de Ciclagem Térmica Utilizando o Efeito Termoelétrico: Aplicação a Caracterização de Ligas com Memória de Forma. **V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2008)**, Salvador. 2008 c. 1-8.

ROWE, D. M. **CRC Handbook of thermoelectrics**. CRC Press, 2005. ISBN 13: 9780849301469.

SAVI, Marcelo; OLIVEIRA, Sergio A.. Os Materiais Inteligentes e suas Aplicações. **Revista Marítima Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 8, p.22-55, abr. 2013.

SUN, L.; HUANG, W. M.; CHEAH, J. Y. The temperature memory effect and the influence of thermo-mechanical cycling in shape memory alloys. **Smart Materials and Structures**, v.19, 2010. 8pp

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6º Edição. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2003. 577 p. ISBN 8521203276.