



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALYSSON DOMINGOS SILVESTRE

**IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA EM HETEROESTRUTURAS PARA
DETERMINAÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM LIGAS DE MEMÓRIA
DO FORMA**

João Pessoa, PB

2023

ALYSSON DOMINGOS SILVESTRE

**IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA EM HETEROESTRUTURAS PARA
DETERMINAÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM LIGAS DE
MEMÓRIAS DE FORMA**

Tese apresentado a Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Dinâmica e Controle de Sistemas Mecânicos.

Orientador: Dr. Cícero da Rocha Souto

João Pessoa, PB

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S587i Silvestre, Alysson Domingos.

Impedância eletromecânica em heteroestruturas para determinação de transformações de fases em ligas de memórias de forma / Alysson Domingos Silvestre. - João Pessoa, 2023.

99 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Engenharia Mecânica. 2. Impedância eletromecânica. 3. Heteroestrutura. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621(043)

Dedico esse trabalho ao Senhor Jesus, a minha esposa Arielly, a meu filho Miguel e aos meus pais, pelo apoio, carinho, paciência e confiança, que me puseram ao longo da vida.



ATA DA DEFESA PÚBLICA DE TESE DE DOUTORADO DO ALUNO ALYSSON DOMINGOS SILVESTRE, DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DO CENTRO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA.

1 Aos quinze dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e três, às 14:30, teve lugar no Auditório do Anexo
2 – Bloco "F" do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, a apresentação e defesa da
3 tese intitulada **"MPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA EM HETEROESTRUTURAS PARADETERMINAÇÃO**
4 **DE TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA"**, pelo aluno **ALYSSON**
5 **DOMINGOS SILVESTRE**, com vistas à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na área de
6 **Dinâmica e Controle de Sistemas Mecânicos**. A Comissão Examinadora foi composta pelos
7 professores: Dr. Cicero da Rocha Souto - UFPB (Orientador), Dr. Abel Cavalcante Lima Filho – UFPB
8 (Examinador Interno), Dr. Rodinei Medeiros Gomes – UFPB (Examinador Interno), Dr. Alexandre Cezar de
9 Castro – UFPB (Examinador Externo) e Dr. Francisco Riccelly Pereira Feitosa – UFPI (Examinador
10 Externo), tendo sido presidida, por indicação dos seus membros, pelo Dr. Cicero da Rocha Souto.
11 Instalada a Banca Examinadora, o Senhor Presidente passou a palavra ao aluno para apresentar a defesa
12 do seu trabalho de tese e este iniciou a apresentação declarando perante a Banca Examinadora e o
13 público presente que o trabalho que irá apresentar é original e de sua autoria. A exposição oral iniciou às
14 14:39, sendo concluída às 15:40, tendo sido iniciada, logo a seguir, a arguição pelos examinadores,
15 finalizando às 16:00. Em seguida, o Senhor Presidente convidou a Banca Examinadora a reunir-se
16 reservadamente para deliberação. Concluída a reunião, o Senhor Presidente convocou o aluno e os
17 demais presentes para proclamar o resultado, tendo sido atribuído, por unanimidade, ao doutorando o
18 conceito **"Aprovado"**, nos termos do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação
19 *Stricto Sensu* da Universidade Federal da Paraíba (Resolução no 34/2014-CONSEPE) e do Regulamento
20 do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade
21 Federal da Paraíba (Resolução nº 13/2019-CONSEPE). Ao final da sessão, após os agradecimentos por
22 parte do aluno, o Senhor Presidente, por recomendação dos membros da Banca, estabeleceu um prazo
23 máximo de 30 dias para o doutorando providenciar as correções sugeridas, ficando a emissão do diploma
24 do título de Doutor condicionada a essas retificações que serão verificadas pelo orientador. Às 16:24, o
25 Senhor Presidente encerrou os trabalhos, determinando a leitura para fins de aprovação e a lavratura da
26 presente ata que vai assinada por todos os membros da comissão examinadora.

27
28 João Pessoa, em 15 de fevereiro de 2023.

29
30
31 Prof. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO

Orientador

32
33
34 Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO

Examinador Interno

35
36
37 Prof. Dr. RODINEI MEDEIROS GOMES

Examinador Interno

38
39
40 Prof. Dr. ALEXANDRE CÉZAR DE CASTRO

Examinador Externo

41
42
43 Prof. Dr. FRANCISCO RICCELly PEREIRA FEITOSA

Examinador Externo

44
45
46

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela demonstração explícita de amor ao entregar a vida de seu filho Jesus na cruz do calvário por amor de nós, e pelo dom da vida. A Jesus Cristo, pelo dom gratuito da salvação, pois por Ele, por meio Dele e para Ele são todas as coisas. Ao Espírito Santo, pelo consolo e presença diária.

Ao Prof. Dr. Cicero da Rocha Souto pela dedicação para realização deste trabalho, sendo um exemplo de orientador presente e ativo, dando todo o suporte necessário para realização do mesmo.

Aos meus colegas de pesquisa José Marques, David Soares e Felipe Silva pelas contribuições dadas durante o desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

Aos colegas de laboratório Wendel, Gustavo, Tony, Felipe, Henrique e Robério. Pelos bons momentos regados a um cafezinho.

Ao Lasea (Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas) pela estrutura e corpo técnico, nas pessoas de Sérgio e Gustavo.

Ao Cear-UFPB (Centro de Energias Alternativas e Renováveis) pela estrutura.

A minha esposa Arielly e ao meu filho Miguel pelo carinho, compreensão e amor que sempre me dedicou.

Aos meus pais que sempre me ensinaram o caminho que devo andar.

Ao IFPE que me concedeu afastamento das atividades docentes para a realização da pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

Soli deo Gloria

“Não há um centímetro quadrado em toda a existência sobre o qual Cristo, que é soberano de todos, não possa gritar: é meu”.

(Abraham Kuyper)

“Ele é antes de todas as coisas, e nele tudo subsiste. Ele é a cabeça do corpo, que é a igreja; é o princípio e o primogênito dentre os mortos, para que em tudo tenha a supremacia.”

Apóstolo Paulo (Cl. 1:17-18)

RESUMO

SILVESTRE, A. D. S. IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA EM HETEROESTRUTURAS PARA DETERMINAÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA 100 f. Relatório de Tese (Doutorado) – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

Os materiais inteligentes evidenciam características intrínsecas espetaculares quando estimulados externamente podendo promover mudanças expressivas em seu estado inicial. Em particular as SMAs (Shape Memory Alloys), tem sido bastante abordada em trabalhos científicos e tecnológicos, pois suas características peculiares de recuperar sua forma previamente estabelecida quando sujeito a um procedimento termomecânico ou eletromagnéticos, as tornam atraentes para os mais diversos usos e aplicações. Contudo, para utilizá-las de maneira adequada é necessário observar alguns aspectos envolvidos no processo que define algumas de suas características, como a transformação de fase. Logo, este trabalho apresenta uma proposta de investigação a um método de princípio operacional diferente, denominado (EMIH) Impedância Eletromecânica em Heteroestrutura como ferramenta aliada ao Differential Scanning Calorimetry (DSC) para medir temperaturas de transformação de fase em ligas SMAs. O método utiliza uma junção de cerâmica piezoelétrica - titanato de zirconato de chumbo (PZT), com o metal SMA. Com isto, é proposto um equipamento capaz de fornecer ciclagem térmica em forma de calor às amostras de PZT/ SMA (heteroestrutura) e sua caracterização. A investigação aborda amostras de: Ni-Ti (Níquel, titânio), para dois tipos de tratamento térmico, Ni-Ti-Nb (Níquel, titânio, Nióbio), Co-Al-Ni (Cobre, Alumínio, Níquel), além de aço, cobre e latão foram analisados. O método proposto avaliou quantitativamente por meio da magnitude da impedância e do ângulo de fase com diferentes frequências fixas e diferentes taxas de aquecimento e resfriamento, obtendo excelentes resultados quando comparados ao método do DSC. Também foi avaliado a capacitância de heteroesturtura.

Palavras-chave: Impedância eletromecânica, Heteroestrutura, Ligas de memória de forma.

ABSTRACT

SILVESTRE, A. D. S. **IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA EM HETEROESTRUTURAS PARA DETERMINAÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM LIGAS DE MMÓRIA DE FORMA** 100 f. Relatório de Tese (Doutorado) – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

Smart materials show spectacular intrinsic characteristics when externally stimulated and can promote significant changes in their initial state. In particular, SMAs (Shape Memory Alloys) have been widely discussed in scientific and technological works, as their peculiar characteristics of recovering their previously established shape when subjected to a thermomechanical or electromagnetic procedure, make them attractive for the most diverse uses and applications. However, to use them properly, it is necessary to understand the properties involved in the process that defines its main characteristic, phase transformation. Therefore, this work presents an investigation proposal for a method with a different operating principle, called (EMIH) Electromechanical Impedance in Heterostructure as an alternative tool to Differential Scanning Calorimetry (DSC) to measure phase transformation temperatures in SMAs alloys. The method uses a piezoelectric ceramic junction - lead zirconate titanate (PZT) with SMA metal. With this, equipment capable of providing thermal cycling in the form of heat to PZT/SMA samples (heterostructure) and its characterization is proposed. The investigation addresses samples of: Ni-Ti (Nickel, titanium), for two types of heat treatment, Ni-Ti-Nb (Nickel, titanium, Niobium), Co-Al-Ni (Copper, Aluminum, Nickel), in addition to steel, copper, and brass were analyzed. The proposed method was evaluated quantitatively through impedance magnitude and phase angle with different fixed frequencies and different heating and cooling rates, obtaining excellent results when compared to the DSC method. Heterostructure capacitance was also evaluated.

Keywords: Electromechanical impedance, Heterostructure, Shape memory alloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Configuração da plataforma experimental para medições de impedância eletromecânica; (b) Materiais e dimensões da estrutura de monitoramento, incluindo interface de acoplamento; (c) Material para experimento	22
Figura 2 - Demonstração de Esquema da base estrutural do experimento de EMI.....	24
Figura 3 - Setup do Experimento.....	25
Figura 4 - Dimensões do substrato de suporte (gesso verde) (b) Modificação da rigidez por etapas com duas perfurações.	26
Figura 5 - (a) Estrutura de trabalho; (b) Dimensões das estruturas de trabalho; (c) Setup Experimental.....	27
Figura 6 - Dispositivo Piezoelétrico utilizado; (b) Piezoelétrico instalado na Estrutura	28
Figura 7 - (a) Amostras de SCC Utilizadas; (b) Aceleração da Corrosão em SCC; (c) Setup de medidas de Impedância Eletromecânica.....	29
Figura 8 - (a) Amostras com PZTs; (b) Sistema para análise em EMI; (c) Frequência natural de vibração da amostra solubilizada e amostras envelhecidas termicamente e os parâmetros EMI com PZTs módulos de Impedância, resistência e reatância	31
Figura 9 - (a) Amostras confeccionadas para ensaio; (b) Setup Experimental; (c) DSC da amostra de Ni-Ti após ciclagem e tratamento térmico; (d) Resposta da EMI da amostra de Ni-Ti em 1 kHz.	32
Figura 10 - Esquema funcional da operacionalidade do acoplamento entre os domínios físicos.	34
Figura 11 - Evolução da fração de martensita (ξ) com a temperatura em LMF.....	37
Figura 12 - Ciclo de carregamento termomecânico representando as transformações da LMF e seu comportamento de memória de forma	38
Figura 13 - Relação tridimensional da tensão, deformação e temperatura para o comportamento mecânico das LMF.	39
Figura 14 - Diagrama esquemático do EMF criado a partir da reversão da martensita induzida por tensão.....	40
Figura 15 - Estrutura Perovskita simétrica e assimétrica.	42
Figura 16 - Representação dos efeitos direto e inverso em transdutores piezoelétricos.	42
Figura 17 - Estrutura monocristal na e policristalina.	44
Figura 18 - Representação do piezoelétrico e nomenclatura utilizada para os eixos	44
Figura 19 - Configuração básica do método da impedância EMI.	47
Figura 20 - Modelo eletromecânico que descreve o processo de medição da assinatura de impedância.....	48
Figura 21 - Fluxograma do Experimento	52
Figura 22 - (a) Representação em CAD do gradiente de temperatura com amostra maior; (b) Representação em CAD do gradiente de temperatura com amostra menor; (c) Representação da amostra na Peltier em escala.....	54
Figura 23 - (a) Configuração do equipamento com Célula Termoelétrica e carga térmica; (b) Disposição da amostra na célula termoelétrica; (c) Vista em perspectiva da máquina de Ciclagem térmica em CAD.....	54

Figura 24 - Diagrama de Blocos do Sistema de Controle implementado.	56
Figura 25 - Diagrama de bloco do PID do LabView©	56
Figura 26 - (a) Placa IBT_2 com chip BTS7960; (b) Diagrama do circuito da placa IBT_2.	57
Figura 27 - (a) Representação em CAD da localização da amostra; (b) Representação em CAD da localização dos termopares.	58
Figura 28 - Representação do Sistema de Acionamento e Controle.	59
Figura 29 - Bancada experimental parcial no Equipamento proposto	60
Figura 30 - Interface Gráfica em LabView®	61
Figura 31 - (a) Amostra sob suporte; (b) Amostra e PZT colados sob pressão; (c) Forno a 100°C; (d) Amostra sob pressão no forno.	62
Figura 32 - (a) Modelo CAD da heteroestrutura; (b) Heteroestrutura SMA/PZT-C64; (c) Heteroestrutura SMA/PZT-PIC255	63
Figura 33 - (a) Degraus de temperatura positivos e negativos aleatórios; (b) Degrau unitário positivo; (c) Degrau de temperatura negativo; (d) Resposta de excitação em degrau unitário na amostra a -20°C.	64
Figura 34 - (a) Ciclagem térmica a um sinal de referência em forma triangular; (b) Comportamento gradiente de temperatura positivo; (c) Comportamento do gradiente de temperatura negativo	66
Figura 35 - Resultados de DSC para todas as amostras	67
Figura 36 - (a) Impedância em função da Temperatura do Aço; (b) Ângulo de Fase em Função da Temperatura do Aço; (c) Impedância em função da Temperatura do Cobre; (d) Ângulo de Fase a Função da Temperatura do Cobre; (e) Impedância em função da Temperatura do Latão.	67
Figura 37 - (a) Comportamento da temperatura controlada na heteroestutura; (b) variável manipulada para controle da temperatura; (c) Magnitude de impedância em função da temperatura no NiTi/PZT-C64; (d) magnitude de impedância em função da temperatura no NiTi 2/PZT-PIC255; (e) Derivada da impedância em função da temperatura NiTi 2/PZT-C64; (f) Derivada da impedância em função da temperatura NiTi 2 /PZT-PIC255 ;(g) Curva de ângulo de fase em NiTi 2/PZT-C64; (h) Curva de ângulo de fase em NiTi 2/PZT-PIC255.....	69
Figura 38 - (a) Curva de magnitude de impedância da NiTi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância da NiTi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância da NiTi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz.	71
Figura 39 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTi/PZT-C64 e (b) Temperatura em função da frequência para NiTi/PZT- PIC255.....	72
Figura 40 - (a) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-C64. (b) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-PIC255.....	73
Figura 41 - Análise das temperaturas críticas da NiTi/PZT-C64 e PIC255	74
Figura 42 - (a) e (b) Temperatura controlada na heteroestutura, (c) Magnitude de impedância em NiTi 1/PZT-C64, (d) magnitude de impedância em NiTi 1/PZT-PIC255,(g) Curva de ângulo de fase em NiTi 1/PZT-C64 e (h) Curva de ângulo de fase em NiTi 1/PZT-PIC255.....	76
Figura 43 - (a) Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 10kHz; (d)	

Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz e Curva de magnitude de impedância NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1MHz	77
Figura 44 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTi 1/PZT-C64; (b) Temperatura em função da frequência para NiTi/PZT- PIC255; (c) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-C64; (d) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-PIC255	79
Figura 45 - (a) Erro em função da frequência para NiTi 1/PZT-C64; (b) Erro em função da frequência para NiTi 1/PZT-PIC255; (c) Erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-C64; (d) Erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-PIC-255.	80
Figura 46 - (a) Comportamento da temperatura controlada na heteroestrutura, (b) variável manipulada para controle da temperatura, (c) Magnitude de impedância em função da temperatura no NiTiNb/PZT-C64, (d) magnitude de impedância em função da temperatura no NiTiNb /PZT-PIC255, (e) Derivada da impedância em função da temperatura NiTiNb/PZT-C64; (f) Derivada da impedância em função da temperatura NiTiNb /PZT-PIC255; (g) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no NiTiNb/PZT-C64 e (h) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no PZT- NiTiNb/PIC255.	81
Figura 47 - (a) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 10kHz ; (d) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz e Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1MHz.	83
Figura 48 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTiNb/PZT-C64; (b) Temperatura em função da frequência para NiTiNb/PZT- PIC255; (c) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTiNb/PZT-C64; (d) Temperatura de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTiNb/PZT-PIC255.	84
Figura 49 - (a) Erro em função da frequência para NiTi 1/PZT-C64; (b) Erro em função da frequência para NiTi 1/PZT-PIC255; (c) Erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-C64; (d) Erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-PIC-255.	86
Figura 50 - (a) Comportamento da temperatura controlada na heteroestrutura, (b) variável manipulada para controle da temperatura, (c) Magnitude de impedância em função da temperatura no CuAlNi/PZT-C64, (d) magnitude de impedância em função da temperatura no CuAlNi/PZT-PIC255, (e) Derivada da impedância em função da temperatura CuAlNi/PZT-C64; (f) Derivada da impedância em função da temperatura CuAlNi/PZT-PIC255; (g) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no CuAlNi/PZT-C64 e (h) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no PZT- CuAlNi/PIC255.	87
Figura 51 - (a) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-C64) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância em função da	

temperatura CuAlNi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 10kHz; (d) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz e Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-PIC255) em 1MHz... 88

Figura 52 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTiNb/PZT-C64; (b) Temperatura em função da frequência para NiTiNb/PZT- PIC255; (c) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTiNb/PZT-C64; (d) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTiNb/PZT-PIC255..... 90

Figura 53 - (a) Erro em função da frequência para CuAlNi/PZT-C64; (b) Erro em função da frequência para CuAlNi /PZT-PIC255; (c) Erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento para CuAlNi /PZT-C64; (d) Erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento para CuAlNi /PZT-PIC-255. 91

Figura 54 - Capacitância da liga Ni-Ti-NB(a) e sua Derivada (b) 93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configurações de Materiais Inteligentes	35
Tabela 2 - Composição das Principais Famílias de LMF esquemático do LMF.....	40
Tabela 3 - Sintonia de Controladores por Ziegler – Nichols	56
Tabela 4 - Propriedades dos sensores PZT: modelos C64 e PIC255.....	62
Tabela 5 - Análise das temperaturas críticas da NiTi/PZT-C64 e PIC255.....	74
Tabela 6 - Análise das temperaturas críticas da NiTi 1/PZT-C64 e PIC255.....	79
Tabela 7 - Análise das temperaturas críticas da NiTiNb/PZT-C64 e PIC255.....	85
Tabela 8 - Análise das temperaturas críticas da CuAlNi/PZT-C64 e PIC255.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(k_{ij})	Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico
A	Austenita
A	Ampere
A _f	Austenita Final
Al	Alumínio
A _s	Austenita inicial
C	Capacitância
CCDM	Correlation Coefficient Deviation
CEC	Sistema Eletromecânico
Cu	Cobre
d	Matriz das constantes de deformação piezoelétrica (m/V);
D	Vetor de deslocamento elétrico (C/m ²);
DAC	Digital-to-analog converter
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E	Vetor de campo elétrico aplicado (V/m);
e	Permissividade (F/m);
E	Campo elétrico
EMF	Efeito Memória de forma
EMI	Impedância eletromecânica
EMIH	Impedância eletromecânica em heteroestruturas
EP	Modulo de elasticidade do material piezoelétrico
f	Frequência
F	Força
g	Matriz das constantes piezoelétricas (m ² /C);
Hz	Hert
K ₀	Constante
KOC	Rigidez de Circuito Aberto
KSC	Rigidez de Curto-Circuito
LMF	Liga de memória de Forma
M	Martensita

m	Mili
M	Mega
MEMS	Sistemas micro eletromecânicos
M_f	Martensita final
MFC	Macro Fiber Composite
min	Minutos
M_s	Martensita inicial
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
NI	National Instruments
NOL	Naval Ordnance Laboratory
PVDF	Polifluoreto de Vinilideno
PWAS	Piezoelectric Wafer Active Sensor
PWM	Pulse Width Modulation
	Pb-Lead Zirconate Titanate – Titanato Zirconato de
PZT	Chumbo
q	Velocidade
R	Resistência
RET	Resistência Elétrica em Função da Temperatura
RMSD	Root Mean Square Deviation
RVNF	Variação Relativo de Frequências Naturais
S	Matriz dos coeficientes de compliança (m^2/N);
s	Segundos
SCC	Corrosão sob Tensão
SE	Superelasticidade
SHM	Monitoramento de Saúde Estrutural
SMA	Shape Memory Alloy
T	Tensão mecânica
T0	Atraso de transporte
Ti	Titânio
u	Micro
V	Tensão
V_0	Polo

VC	Variável controlada
VM	Variável manipulada
X	Reatância
Z	Impedância (ohm)
Z _E	Impedância Elétrica
Z _m	Impedância mecânica
Z _S	Impedância mecânica
β	componente de não permissividade (m/F);
ε	vetor de deformação (m/m);
σ	vetor de tensão mecânica (N/m ²);

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	13
Capítulo 1	18
1.1. Introdução	18
1.2. Objetivos	19
1.3. Contribuição da Tese.....	20
1.4. Organização do Trabalho	20
Capítulo 2 - Revisão da Literatura	21
Capítulo 3 - Fundamentação Teórica	34
3.1. Materiais Inteligentes	34
3.2. Ligas com Memória de forma	35
3.3. Transdutores Piezoelétricos.....	41
3.4. Princípio da Impedância Eletromecânica	47
3.5. Métricas para Detecção de Danos	50
Capítulo 4 - Materiais e Métodos	51
4.1 Projeto Detalhado.....	53
4.1.1 Projeto e Concepção da Máquina de Ciclagem Térmica.....	53
4.1.2 Controle, Instrumentação e Aquisição de Dados	55
4.2 Organização das Amostras	61
Capítulo 5 - Resultados Preliminares e Discussões	64
Capítulo 6 - Considerações Finais	94
6.1. Conclusões	94
6.2. Sugestões e Trabalhos Futuros.....	96
6.3. Referências Bibliográficas	97

Capítulo 1 - Introdução

Materiais inteligentes têm características peculiares que os tornam muito atraente pela capacidade de mudar de estado em mais de um domínio físico (SUN et al., 1995). Entre os materiais incluídos nesta classe, ligas com memória de forma e cerâmicas piezoelétricas são particularmente importantes devido às propriedades termomecânicas e eletromecânicas e capacidades de interação, respectivamente. Sob certas condições, SMAs (Shape Memory Alloys) exibem comportamentos não lineares com dois efeitos distintos: o efeito de memória de forma e pseudoelasticidade. O efeito de memória de forma é caracterizado pela capacidade de o material para recuperar grandes deformações, aparentemente plásticas, mas reversível através da aplicação de calor. No entanto, a pseudoelasticidade é caracterizada pela recuperação completa de grandes deformações quando o material estiver a uma temperatura igual ou superior à temperatura necessária para completar a formação de austenita (LAGOUDAS, 2008). Entre as propriedades das SMAs, temperaturas críticas onde as transformações de fase ocorrem são de grande importância. Em muitas aplicações, é necessário conhecer as temperaturas inicial e final de austenita (A_s ; A_f), bem como as temperaturas inicial e final de martensita (M_s ; M_f) para o uso adequado do material (LAGOUDAS, 2008). As ligas com memória de forma encontraram aplicações crescentes no campo da biomedicina devido à sua boa biocompatibilidade e resistência à corrosão. A aplicação mais proeminente das SMAs é a implementação de stents e membros na área de reabilitação humana, bem como a sua utilização em equipamentos e ferramentas para cirurgias, como aparelhos de endoscopia (“E. Zanaboni”, 2008; SILVA; SILVA, 2018). Eles também atraíram a atenção de pesquisadores que desenvolvem motores termoelétricos e de a indústria aeroespacial em geral (DA ROCHA SOUTO et al., 2014; MANFREDI et al., 2017). Atualmente, um número crescente de estudos trata da caracterização e modelagem de MEMs (CORTEZ-VEGA et al., 2018). Ao serem deformados, os materiais piezoelétricos produzem uma tensão elétrica proporcional à deformação; quando submetido a um campo elétrico, ocorre o efeito inverso, gerando uma deformação mecânica em sua estrutura cristalina. Do ponto de vista microscópico, o efeito piezoelétrico é caracterizado pelo deslocamento de dipolos elétricos na estrutura cristalina. Células unitárias de cerâmicas piezoelétricas de titanato de zirconato de chumbo (PZT) a temperaturas abaixo do ponto Curie exibem uma polarização espontânea devido a uma assimetria na estrutura cristalina, que gera um momento dipolar permanente (CHINA; 2011). Cerâmicas piezoelétricas são usadas em uma variedade de dispositivos, incluindo geração de energia elétrica, atenuação de vibração mecânica e aplicações para monitoramento de integridade estrutural (RANGEL et al., 2017).

Eles também são usados em larga escala como campainhas em equipamentos eletrônicos. Geralmente, ao unir cerâmica piezoelétrica a outros materiais, essas chamadas heteroestruturas, combinam propriedades dos componentes piezoelétricos com outros recursos, até criando novos efeitos. PZT/SMA (heteroestruturas) foram desenvolvidas para aplicações em dispositivos de sistemas micro eletromecânicos (MEMS). Este tipo de aplicação é bastante amplo, envolvendo microbombas e microplacas para uso em cirurgias minimamente invasivas, para remoção de tumores (CHOUDHARY; KAUR, 2010; CHOUDHARY; PHYSICAL; 2016.). As propriedades observáveis dos materiais piezoelétricos são modificadas quando acopladas a outros materiais; no entanto, quando acopladas às SMAs, as características de transformação de fases destes últimos são percebidas. Então, quando um SMA experimenta uma transformação de fase, a rigidez mecânica é modificada e o PZT / SMA (heteroestrutura) responde com modificação em sua impedância elétrica (DA ROCHA SOUTO et al., 2014). O mecanismo de alteração da rigidez é governado por a variação de temperatura, onde a SMA muda de um valor mais alto (fase austenita) a uma rigidez mais baixa (fase martensita) ou vice-versa.

Por meio do monitoramento da variação da rigidez mecânica de um SMA, este projeto apresenta uma proposta de contribuição na implementação prática de um método aliado, chamado de Método da Impedância Eletromecânica em heteroestruturas (EMIH). Este método aplica a técnica de impedância eletromecânica para a determinação de temperaturas de transformação de fase de SMAs para um SMA/PZT (Heteroestrutura).

1.1. Objetivos

Este trabalho de tese para doutorado tem como objetivo propor uma investigação do uso da técnica de impedância eletromecânica (EMI) como ferramenta aliada para medir temperaturas de transformação de fase das SMAs (Shape Memory Alloys) em uma heteroestrutura formada por material piezoelétrico e material de liga com memória de forma (heteroestrutura). Como objetivos específicos, temos:

- Projetar, desenvolver e analisar um equipamento capaz de realizar ciclagem térmica controlada em heteroestruturas entre 100°C e -20°C;
- Aplicar a técnica de EMIH nas ligas propostas
- Analisar o comportamento da técnica em múltiplas frequências de excitação e a taxa de variação de tempo;

- Analisar o comportamento da técnica em ligas variadas
- Propor método de análise por Capacitância;
- Comparar os resultados obtidos e consolidar a nova técnica como ferramenta aliada ao Differential Scanning Calorimetry (DSC) para medir temperaturas de transformação de fase em ligas SMA's;

1.2. Contribuição da Tese

Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidos diversos trabalhos utilizando a impedância eletromecânica (EMI) como principal técnica para monitoramento de saúde estrutural, detecção de danos e rastreamento de trincas. Recentemente alguns pesquisadores tem aplicado a mesma técnica para monitoramento de perda de massa e também monitorado transformações de fases em ligas de memória de forma, através da resistência elétrica da mesma. Desta feita, a contribuição desde trabalho de tese, trata-se da utilização do método com o princípio operacional diferente, denominado Impedância Eletromecânica em Heteroestrutura (EMIH) como ferramenta aliada ao Differential Scanning Calorimetry (DSC) para medir temperaturas de transformação de fase em ligas SMAs. O método proposto também avalia outras grandezas físicas como a capacitância e o ângulo de fase

1.3. Organização do Trabalho

Levando em consideração também a introdução, este trabalho se divide em seis capítulos distintos, sendo composto pela introdução, revisão da literatura, fundamentação teórica, materiais e métodos, resultados e discussões, considerações finais e referências utilizadas. Todos contendo os seus respectivos subtópicos.

No Capítulo 2, tem-se a revisão da literatura acerca dos trabalhos relevantes utilizando impedância eletromecânica para monitoramento de integridade estrutural.

No capítulo 3, apresenta-se a fundamentação teórica utilizada para o embasamento da pesquisa dividida em cinco bases. A primeira trata-se de um panorama geral sobre materiais inteligentes, a segundo apresenta os conceitos fundamentais das Ligas de Memória de Forma. A terceira trata-se dos transdutores piezoelétricos e seu princípio de funcionamento. A quarta

apresenta o princípio da impedância eletromecânica e por último, a cinco apresenta as métricas para detecção de danos e de integridade estrutural.

No Capítulo 4, apresentam-se os materiais e os métodos que foram aplicados na obtenção dos resultados, através dos projetos, fabricações, circuitos, experimentos, testes e análises.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados experimentais e computacionais obtidos, acrescentando-se discussões, comparação ou justificativa se fizer necessária.

No Capítulo 6, apresentam-se as considerações finais sobre os resultados obtidos e as sugestões para a continuação dos trabalhos.

Capítulo 2 - Revisão da Literatura

A técnica de medição de impedância eletromecânica (EMI) é um dos métodos mais difundidos em Monitoramento de Saúde Estrutural (SHM), com muitas aplicações importantes em infraestruturas de engenharia civil (pontes, edifícios, estradas, plataformas petrolíferas, etc.), as estruturas aeronáuticas e aeroespaciais (aviões, helicópteros, satélites, estações espaciais, etc.) e as grandes estruturas marítimas (submarinos e navios). O SHM é definido na literatura também como a aquisição, validação e análise de dados técnicos para facilitar as decisões de gestão durante o ciclo de vida de uma estrutura (FARRAR; WORDEN, 2012).

Os sistemas de monitoramento de integridade estrutural têm a finalidade de detectar, em tempo real ou não, danos estruturais. Segundo (RYTTER, 1993) em sistemas avançados há um processo de cinco passos a ser seguido:

(1) detectar a existência de dano;

(2) localizá-lo na estrutura;

(3) identificar o seu tipo;

(4) avaliar a sua extensão;

(5) determinar o tempo restante de vida útil da estrutura. A motivação é tanto científica como econômica.

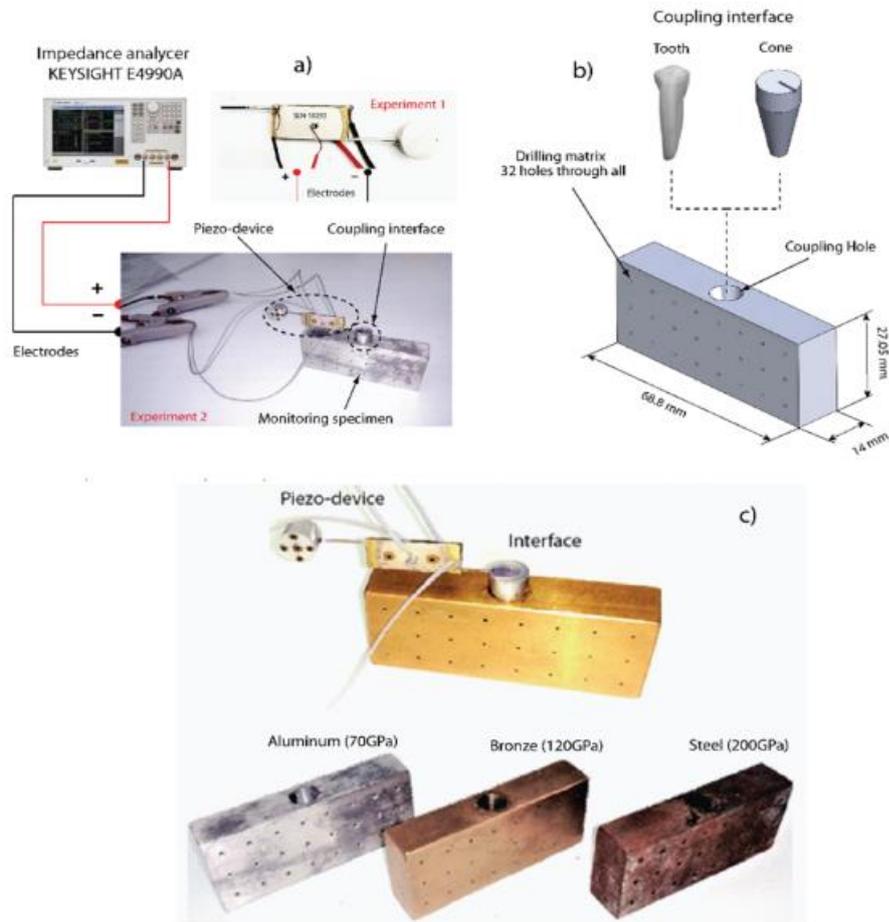
Do ponto de vista científico, monitorar e detectar danos estruturais significa conquistar um elevado grau de segurança. Do ponto de vista econômico, sistemas com essa capacidade permitem uma economia significativa em manutenção. Um sistema de monitoramento baseado na técnica da impedância utiliza ambos os efeitos piezelétricos (direto e reverso), simultaneamente, para obter uma assinatura de impedância para a estrutura (PARK; INMAN, 2005).

Vários testes experimentais foram feitos utilizando diferentes tipos e tamanhos de estruturas tubulares e vários modelos de cerâmicas piezelétricas. Para a detecção de danos nessas estruturas tubulares, utilizaram dois índices de falha métrica, o *Root Mean Square Deviation* (RMSD) e o *Correlation Coefficient Deviation Metric* (CCDM). Nos trabalhos citados, foi possível identificar danos no corpo principal dos segmentos do tubo, onde é demonstrado que é viável a detecção de danos em estruturas utilizando transdutores piezelétrico de baixo custo (PITA; TURRA; VIEIRA FILHO, 2013). GAO et al, (2018), realizou estudos em lajes de concreto inteligentes com transdutores piezoelétricos tubulares embutidos para detecção de danos. Verificação de integridade estrutural em concreto também foi abordada por (LIANG et al., 2016; SU et al., 2019).

A utilização de sensores piezoelétricos integrados para monitoramento de integridade estrutural (detecção de falhas, rigidez), em particular, tem se expandido na última década e torna-se uma das principais linhas de pesquisa de importantes grupos de pesquisa dos EUA e na Europa. Dentre as técnicas que utilizam esse tipo de material, existem aquelas que fornecem informações globais da estrutura, baseadas na variação da resposta vibracional da pastilha piezelétrica, como a frequência modal, e aquelas que fornecem informações locais, utilizando altas frequências, como as técnicas de impedância /admitância (PARK et al., 2003; SUN et al., 1995), as técnicas de ondas (LAW; LIAO; HUANG, 2006; PARK et al., 2006), os estudos de técnicas em ambientes ruidosos (CAMPEIRO; DA SILVEIRA; BAPTISTA, 2018). Estudos comparativos utilizando frequências e modos de vibração em métodos de identificação de dano para estruturas tipo viga, podem ser encontrados em (KIM et al., 2003; MAIA et al., 2003; OWOLABI; SWAMIDAS; SESHADRI, 2003; PALACZ, 2002), também foram realizados estudos comparativos quanto as técnicas de medição e aquisição de dados com (BUDOYA; BAPTISTA, 2018). Estes estudos mostraram que as frequências e as respostas correspondentes aos três primeiros modos de vibração são suficientes para detectar a existência da falha.

Tinoco et al. (2019) propôs uma avaliação de um sensor piezo-atuado para monitorar variações elásticas de seu suporte com medidas baseadas em impedância eletromecânica. A estrutura base é monitorada através de uma interface de acoplamento conectada ao dispositivo acionado por um piezoelétrico. Duas interfaces de acoplamento foram consideradas (um cone de alumínio e um dente humano) para os testes experimentais, conforme pode ser observado na figura 1.

Figura 1 -(a) Configuração da plataforma experimental para medições de impedância eletromecânica; (b) Materiais e dimensões da estrutura de monitoramento, incluindo interface de acoplamento; (c) Material para experimento



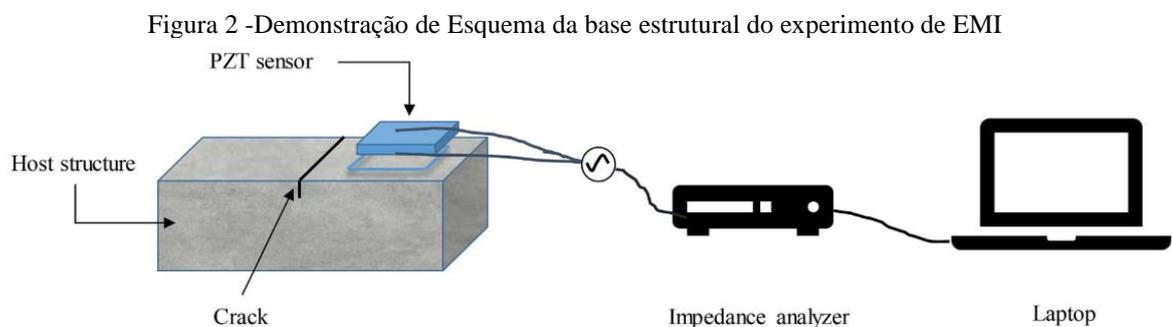
Fonte: Tinoco,2019

Três materiais diferentes (alumínio, bronze e aço) foram preparados para simular as mudanças elásticas no suporte, mantendo a geometria como parâmetro fixo. O dispositivo piezo foi caracterizado a partir das funções de resposta em frequência da velocidade, a fim de entender como os modos de vibração estimulam a resistência elétrica através dos picos de ressonância elétrica do sensor. Uma análise baseada em impedância (1–20 kHz) foi realizada para correlacionar variações elásticas com índices baseados no desvio médio quadrático da raiz (RMSD) para duas janelas de observação (9,3 a 9,7 kHz e 11,1 a 11,5 kHz). Os resultados desse trabalho mostraram que variações elásticas impostas foram detectadas e quantificadas com as medidas de resistência elétrica. Além disso, foi demonstrado que a sensibilidade do dispositivo foi influenciada pelo tipo de interface de acoplamento, uma vez que o cone era mais sensível que o dente nas duas janelas de observação.

Foi desenvolvido por Srivastava, *et al* (2019), um trabalho a qual aplica a técnica da impedância eletromecânica no monitoramento da rigidez em osso humano, na busca de rachaduras e danos gerais, utilizando heteroestruturas (LMF/PZT). A técnica apresenta eficácia

na comparação de danos no osso fêmur saudáveis e com osteoporose (SRIVASTAVA; BHALLA; MADAN, 2019).

Kim et al, (2019), apresenta o método de avaliação de desempenho para reparo de trincas em concreto usando a técnica de impedância eletromecânica baseada em PZT. As rachaduras no concreto são consideradas um importante indicador de possíveis danos e durabilidade e geralmente são monitoradas na manutenção estrutural. Um método típico de reparo na prática para rachaduras no concreto envolvendo problemas de durabilidade é usar materiais alternativos para preencher as rachaduras. Como a qualidade da recuperação do reparo é difícil de determinar, é necessária uma abordagem de avaliação eficaz, conforme figura 2.



Fonte: (KIM et al., 2019)

O estudo desenvolvido, apresenta uma aplicabilidade da técnica EMI baseada em PZT para a avaliação da qualidade do reparo de trincas no concreto. Para determinar uma faixa de frequência ideal que reflita fortemente a condição estrutural, as tendências de quatro indicadores de dano são investigadas com várias gravidades de dano em cada faixa de sub-frequência. Posteriormente, o desempenho do material de reparo de trincas é avaliado usando a faixa de frequência ideal predefinida com os indicadores de danos. A abordagem proposta é mostrada para avaliar efetivamente a qualidade da recuperação do material de reparo de trincas ao longo do tempo. (KIM et al., 2019)

Figura 3 -Setup do Experimento

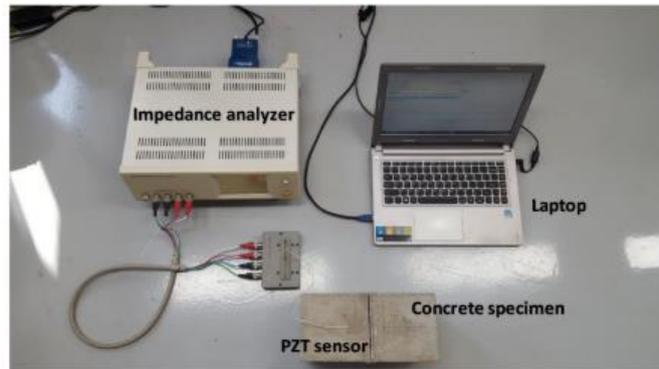


Fig. 2. Experimental setup.

Table 1
Specifications of the PZT sensor used in this experiment.

Properties	Values
Density [g/cm ³]	7.8
Relative permittivity in the polarization direction	2400
Dielectric loss factor	0.02
Piezoelectric charge coefficient [10 ⁻¹² C/N]	-210
Elastic stiffness coefficient [10 ¹⁰ N/m ²]	10
Mechanical quality factor	100
Temperature coefficient [10 ⁻² /K]	6

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [E(i) - E_R(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [E_R(i)]^2}}$$

$$\text{MAPD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |[E(i) - E_R(i)]/E_R(i)|$$

$$\text{Cov} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [E(i) - \bar{E}][E_R(i) - \bar{E}_R]$$

$$\text{CCD} = 1 - \frac{1}{N\sigma_E\sigma_{E_R}} \sum_{i=1}^N [E(i) - \bar{E}][E_R(i) - \bar{E}_R]$$

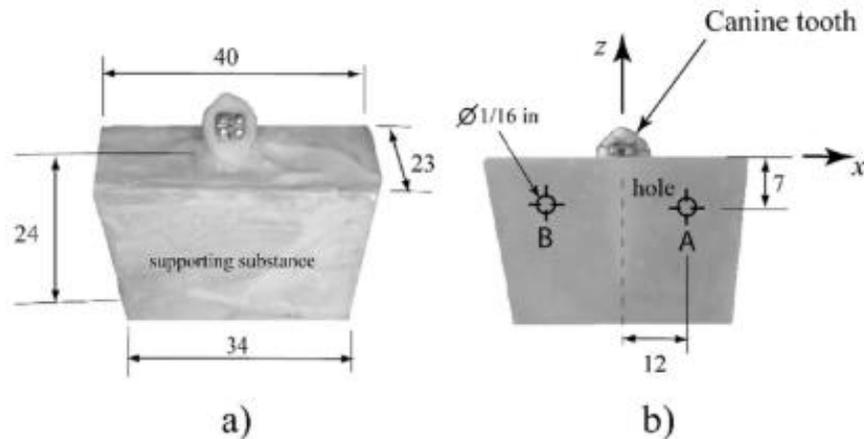
Fonte: (KIM et al., 2019)

A técnica EMI usada neste estudo é mais investigada em termos de duas questões importantes: (1) o efeito das camadas de ligação (cola) e (2) variações de temperatura. A camada de ligação é uma interface entre o sensor PZT e a estrutura de destino, que normalmente é representada como a espessura do adesivo usado. Como a rigidez da camada de ligação é geralmente menor que a da estrutura e sensível às condições ambientais, uma prática comum é ter uma camada de ligação mais fina que um terço da espessura do PZT usados. Os resultados experimentais deste estudo podem ser resumidos da seguinte forma: (1) As faixas de baixa frequência, que incluem os picos dominantes, foram as mais sensíveis às mudanças estruturais. Neste estudo, a faixa de frequência ideal foi determinada entre 50 e 99,9 kHz. O (2) A técnica EMI mostrou que o material cimentício exibiu impedância gradual e recuperação de admissão ao longo do tempo. Chegando à conclusão que os indicadores de danos RMSD, MAPD e CCD são efetivos aos objetivos propostos.

TINOCO et al, (2017) desenvolveu um trabalho onde trata-se de uma análise e identificação de variações de rigidez em substâncias de suporte de um dente canino humano utilizando um sensor piezoelétrico de feixe de suporte e sua impedância eletromecânica. Nesse trabalho, um método experimental é descrito para identificar as variações de rigidez produzidas por perfurações realizadas em diferentes substâncias de suporte de um dente canino humano, conforme figura 4. Para medir os parâmetros das substâncias de suporte através de um canino, foi desenvolvido um sistema sensor-atuador. O dispositivo sensor-atuador é composto por um

suporte de aço inoxidável ligado a um fio de aço acoplado a dois transdutores piezoelétricos, com uma massa concentrada presa à extremidade do fio.

Figura 4 - Dimensões do substrato de suporte (gesso verde) (b) Modificação da rigidez por etapas com duas perfurações.

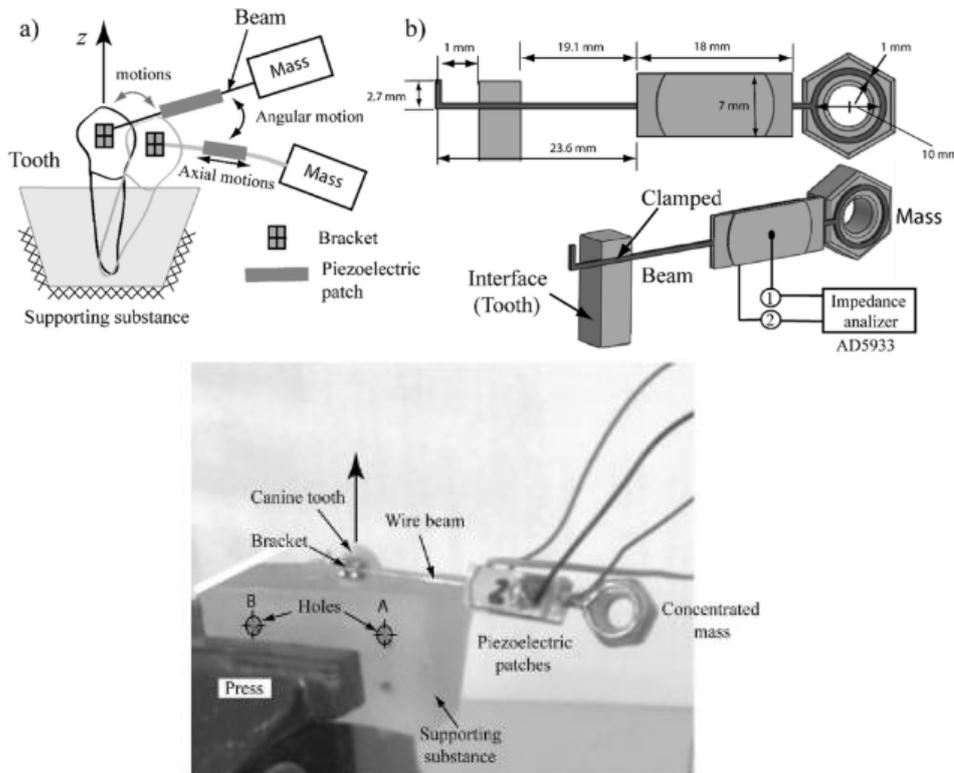


Fonte: (TINOCO et al. (2017))

Para excitar o dispositivo, em alta frequência (entre 5 e 10 KHz) foi aplicada através dos piezo-transdutores, que afetam o dente por meio da vibração do fio. As respostas mecânicas associadas à rigidez do suporte foram quantificadas com a impedância elétrica dos piezo-transdutores. O dispositivo foi acoplado à coroa de um dente canino, simulando uma condição de fixação, pois no osso, o dente foi preso pela parte da raiz dentro da substância de suporte. Quatro substâncias de suporte foram caracterizadas para os testes. Após estabelecer os valores base da rigidez de cada substância de suporte, as variações de rigidez foram avaliadas em duas etapas (duas perfurações); estes foram feitos perpendicularmente ao eixo longitudinal do dente. Os resultados do trabalho mostraram que é possível avaliar as variações de rigidez com a metodologia proposta, bem como quantificar as diferenças de rigidez, por meio de índices de variação.

Os experimentos realizados mostraram que as variações de rigidez podem ser observadas através das frequências, bem como identificadas e quantificadas com as medidas. Portanto, em um contexto clínico, percebemos uma oportunidade de estudar a densidade óssea no osso alveolar, utilizando um método não invasivo e de baixo custo. No entanto, o autor afirma que muitos aspectos experimentais devem ser aprimorados para diminuir os erros induzidos nas experiências propostas.

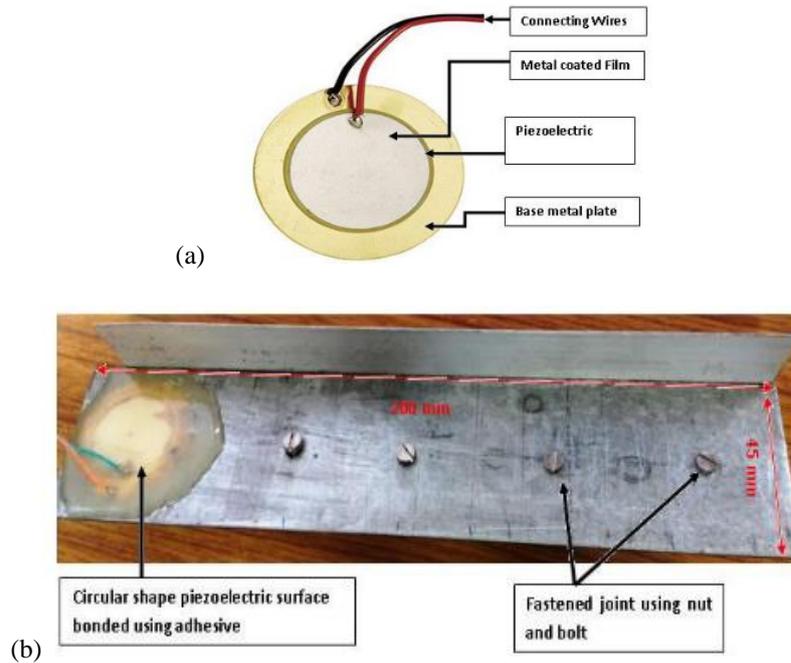
Figura 5 -(a) Estrutura de trabalho; (b) Dimensões das estruturas de trabalho; (c) Setup Experimental.



Fonte: (TINOCO et al. (2017))

SAMANTARAY, (2018) propõe o uso do método de impedância eletromecânica para monitorar folgas incipientes em estruturas articuladas visando segurança ferroviária. No sistema de via férrea, estão disponíveis várias juntas mecanicamente presas, as quais estão sujeitas a tensões de serviço complexas e garantir a segurança estrutural dessa junta é uma tarefa vital. Apesar várias técnicas não destrutivas disponíveis para manutenção e monitoramento, mas a maior parte dessa intervenção humana com decisão subjetiva. Este artigo apresenta uma abordagem de monitoramento de saúde estrutural (SHM) com o conversor de impedância AD5933 usando a técnica de impedância eletromecânica (EMI) para monitorar a articulação fixada mecanicamente. Nesta investigação, são realizadas experiências em tira de material de estanho, uma superfície de diafragma circular piezoelétrico ligada à estrutura para detecção de danos com base no método EMI. Os resultados experimentais relatam que a técnica mede com sucesso o sinal de impedância da junta parafusada com uma boa repetibilidade. Essas experiências baseiam a técnica de impedância eletromecânica aplicada em aplicações de segurança ferroviária

Figura 6 -Dispositivo Piezoeletrico utilizado; (b) Piezoeletrico instalado na Estrutura

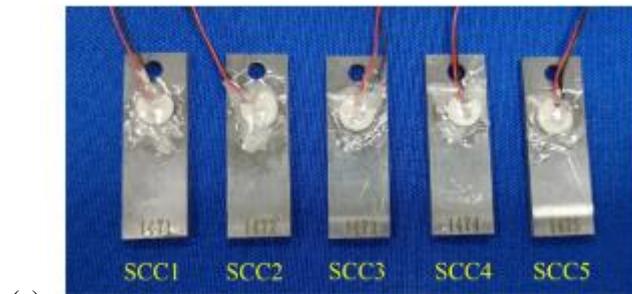


Fonte: (SAMANTARAY, 2018)

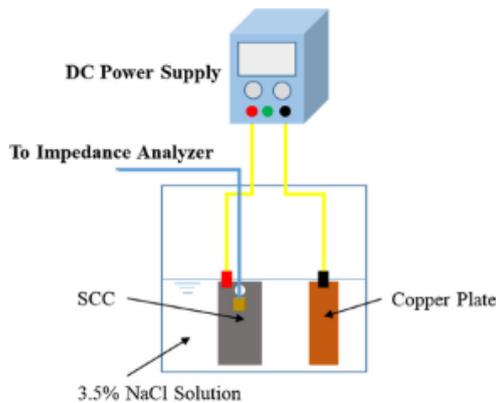
O painel de avaliação AD5933 mostra um alto nível de repetibilidade, em condições danificadas e em boas condições. O AD5933 pode ser facilmente utilizado com uma matriz de sensores para monitorar a junta dos fixadores mecânicos no sistema de trilhos ferroviários. O efeito da temperatura e da tensão de excitação foram considerados em o sinal de entrada de eletricidade; portanto, a engenharia prática deve considerar o fator de temperatura do sensor piezoelétrico e a ligação à estrutura nas análises posteriores.

LI et al. (2019) investiga e analisa corrosão sob tensão (SCC) usando piezoeletricos e impedância eletromecânica. Motivado pela perda de material induzida por corrosão em estruturas metálicas. A ideia básica do método de monitoramento de corrosão é que a perda de espessura do SCC induzida por corrosão leva à variação nas assinaturas EMI. O sistema em SCC foi fabricado ligando um adesivo PZT a uma amostra para corrosão. As assinaturas EMI do SCC sob diferentes quantidades de corrosão foram adquiridas e analisadas. Os resultados mostraram que os picos nas assinaturas de condutância apresentam deslocamento para a esquerda e as frequências de pico diminuem linearmente com o aumento da quantidade de corrosão.

Figura 7 - (a) Amostras de SCC Utilizadas; (b) Aceleração da Corrosão em SCC; (c) Setup de medidas de Impedância Eletromecânica

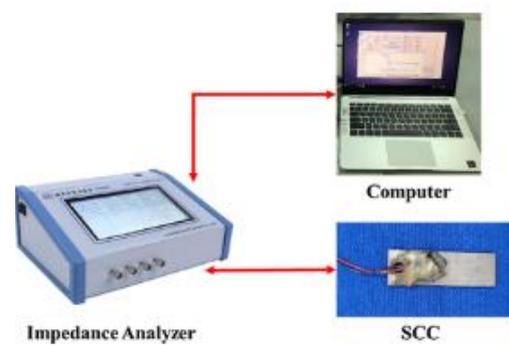


(a)



(b)

Fig. 3. Accelerated corrosion test on SCC.



(c)

Fig. 4. EMI measurement setup.

Fonte: LI et al. (2019)

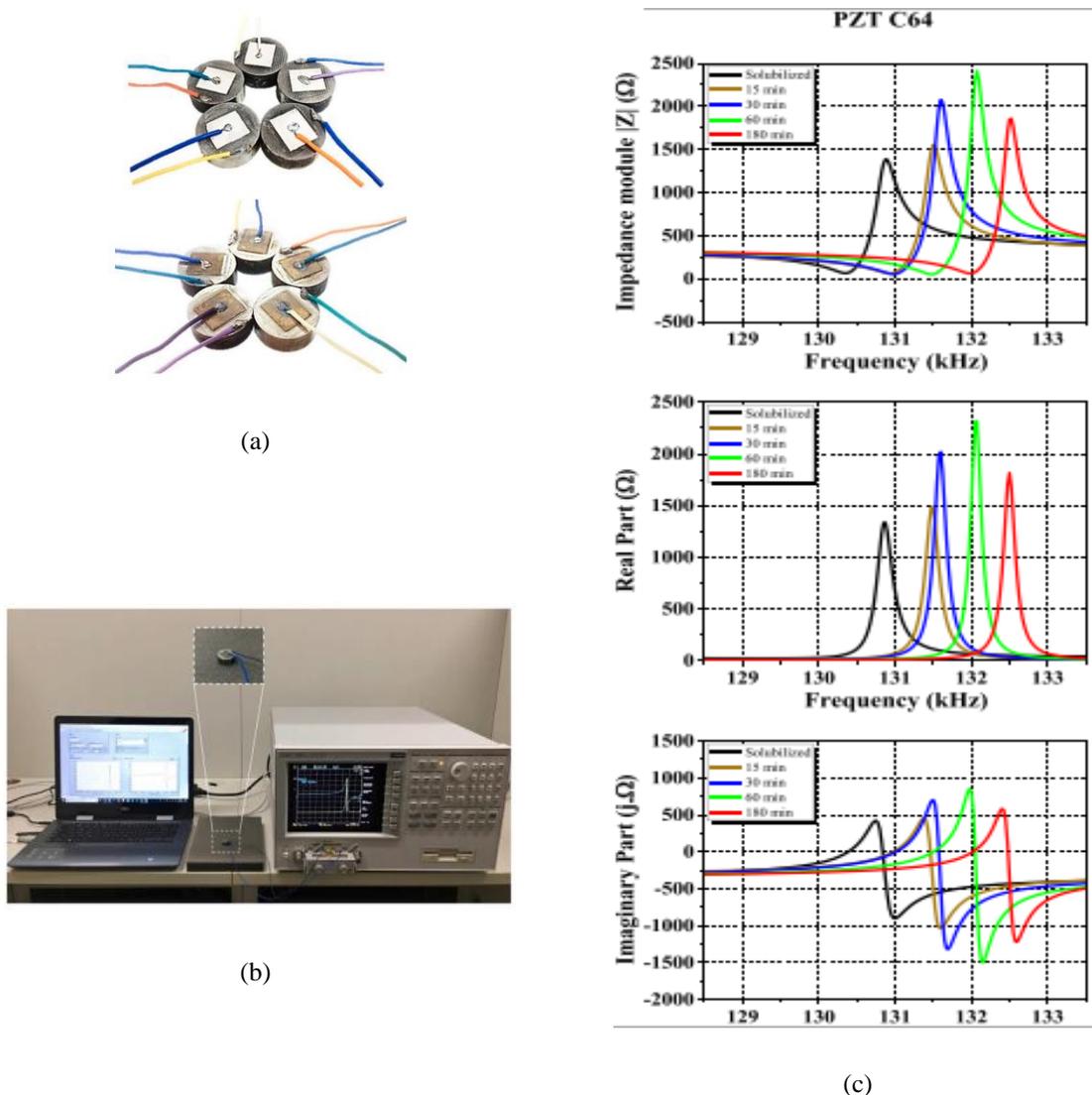
Para obter mais informações sobre o sistema eletromecânico do CEC, também foram realizadas análises de elementos finitos para estudar a resposta EMI e as características modais. Os resultados da simulação concordaram bem com os resultados experimentais. E verificou-se que os modos de flexão acoplados são muito sensíveis à perda de espessura induzida por corrosão. Os autores afirmam que o método de corrosão inteligente proposto é econômico, capaz de determinar quantitativamente a quantidade de corrosão e possui potencial de aplicação promissor. As assinaturas EMI do SCC sob diferentes quantidades de corrosão foram adquiridas usando o analisador de impedância. Seis picos principais nas assinaturas de condutância foram analisados. Verificou-se que os picos mostram um deslocamento para a esquerda e as frequências de pico diminuem linearmente com o aumento da quantidade de corrosão. A resposta EMI se mostrou boa concordância com os resultados experimentais. Os resultados da análise modal mostraram que os modos acoplados do sistema eletromecânico do SCC são muito sensíveis à perda de espessura induzida pela corrosão. Os autores também afirmam que, as frequências modais de todos os modos de flexão diminuem com o aumento da quantidade de corrosão, o que pode ser explicado pela redução da rigidez da placa. No entanto, os modos de extensão no plano não são sensíveis à perda de corrosão. O sistema de corrosão inteligente

proposto tem as vantagens da determinação quantitativa e econômica de corrosão quantidade e capacidade de monitoramento on-line e remoto.

Pierre, (2010) apresentou o desenvolvimento de um equipamento de análise térmica cuja técnica termoanalítica utilizada é a termoeletrometria. O equipamento desenvolvido é direcionado a caracterização das temperaturas de transformação de fase e histerese térmica de Ligas com Memória de Forma (LMF) através da resistividade elétrica da liga, levantando assim, uma curva resistência temperatura. Os resultados obtidos nesse trabalho concluíram que os módulos termoeletrônicos de Peltier é perfeitamente aplicável na caracterização térmica de ligas com memória de forma. Silva, (2012) também apresenta um trabalho que traz o projeto, montagem e avaliação de um protótipo termoeletrônico idealizado para congelamento unidirecional por contato direto de amostras consistentes em placa Peltier. O protótipo termoeletrônico foi testado como ferramenta de estudos térmicos, evidenciando-se a possibilidade de seu uso para determinação da região de transição vítrea de congelamento. A utilização desse aparato para análises térmicas viabiliza e torna mais eficiente o processo comparativamente aos métodos tradicionalmente empregados como o DSC, pois, trata-se de um equipamento simples, de baixo custo de montagem, facilidade de operação e que opera a partir do princípio básico da termoeletricidade (SILVA, 2012).

Silva et al, (2020) aplica a técnica de impedância eletromecânica no monitoramento de fragilização da fase sigma em aço inoxidável duplex. O trabalho investiga, o efeito do tratamento isotérmico de envelhecimento a 800°C (temperatura na qual a fase σ pode ser formada) na degradação das propriedades mecânicas do UNS S31803 DSS foi investigado. Os resultados mostraram que a precipitação da fase σ ocorreu regularmente e por decomposição eutetóide. O efeito da fase sigma nas propriedades mecânicas foi analisado pelos testes de microdureza e testes de impacto. A avaliação do DSS também inclui um método alternativo de monitoramento da fragilização da fase σ com base na impedância eletromecânica (EMI), usando sensores piezoelétricos. A ideia básica do monitoramento da fase σ é a observação da fragilização é que o aumento da dureza e a diminuição da tenacidade. Essa mudança vai levar à variação nas assinaturas EMI, modificando a rigidez estrutural. A metodologia proposta pelos autores do trabalho é avaliada através do módulo de impedância ($|Z|$), resistência (R), reatância (X) e pelos índices estatísticos: Variação Relativo de Frequências Naturais (RVNF) e Desvio Quadrático Médio (RMSD). Este método é considerado um teste não destrutivo, apresenta resultados precisos com alta sensibilidade e confiabilidade proporcionando capacidade de determinar a fragilização da fase sigma.

Figura 8 - (a) Amostras com PZTs; (b) Sistema para análise em EMI; (c) Frequência natural de vibração da amostra solubilizada e amostras envelhecidas termicamente e os parâmetros EMI com PZTs módulos de Impedância, resistência e reatância



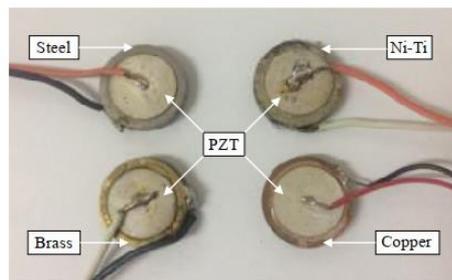
Fonte: (SILVA et al., 2020).

A análise de microscopia óptica provou que a fase σ precipitou tanto regularmente quanto por eutetóide de composição da ferrita, gerando a sigma e as fases secundárias da austenita ($\alpha \rightarrow \sigma + \gamma_2$). Foi verificado por meio de ensaios mecânicos convencionais (destrutivos) de microdureza Vickers e tenacidade ao impacto que a presença da fase sigma ocasionou um aumento na dureza por 19% e consequente perda de tenacidade em 92% na amostra envelhecida para 180 min em comparação com a amostra solubilizada. Ambos os resultados para o módulo de impedância, resistência e reatância elétrica, bem como os índices RVNF e RMSD comprovaram a influência da fase sigma na variação das frequências naturais nos espécimes, modificando a rigidez estrutural causada pela fragilização do aço inoxidável duplex. Com base nesses resultados, correlações lineares com valores de R^2 de 0,94 foram

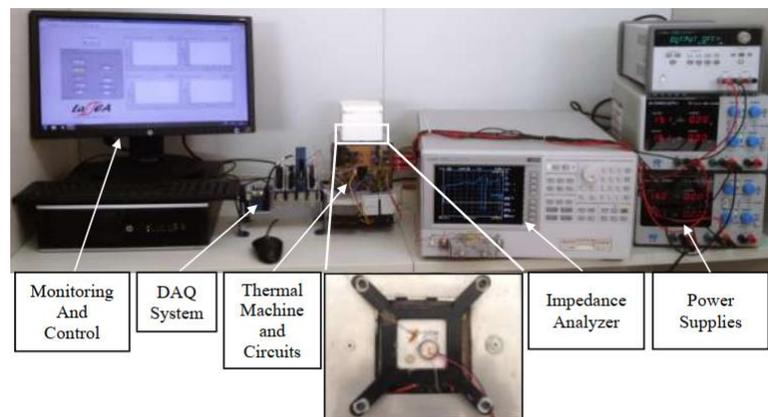
encontrados entre os dados de frequência natural para ambos os PZTs e microdureza (SILVA et al., 2020).

Cunha et al, (2019) aplicou o método de medição de Impedância Eletromecânica (EMI) para determinar as temperaturas de transformação de fases em Ligas com Memória de Forma (LMF). A técnica foi empregada em uma Heteroestrutura composta por piezoelétrico de Zirconato Titanato de Chumbo (PZT) e LMF.

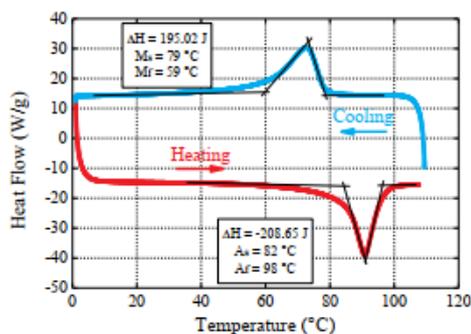
Figura 9 - (a) Amostras confeccionadas para ensaio; (b) Setup Experimental; (c) DSC da amostra de Ni-Ti após ciclagem e tratamento térmico; (d) Resposta da EMI da amostra de Ni-Ti em 1 kHz.



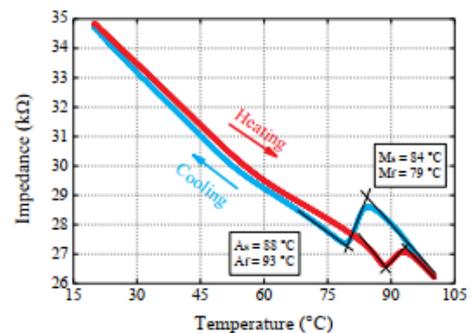
(a)



(b)



(c)



(d)

São apresentados resultados experimentais da determinação das temperaturas de transformação de fases da LMF pelo EMIH entre 100°C e 20°C, e comparados com resultados do método tradicional Differential Scanning Calorimetry (DSC). Além desses, os autores mostram em seu trabalho resultados comparativos do comportamento da LMF com o cobre, aço e latão. A análise da impedância elétrica utilizada nesta pesquisa foi realizada por um analisador de impedância comercial de alta exatidão, modelo Agilent 4294A. Este equipamento possibilita ajustar o nível de tensão de oscilação de 5 mV a 1 V ou 200 μ A a 20 mA, e a frequência de trabalho de 40 Hz a 110 MHz.

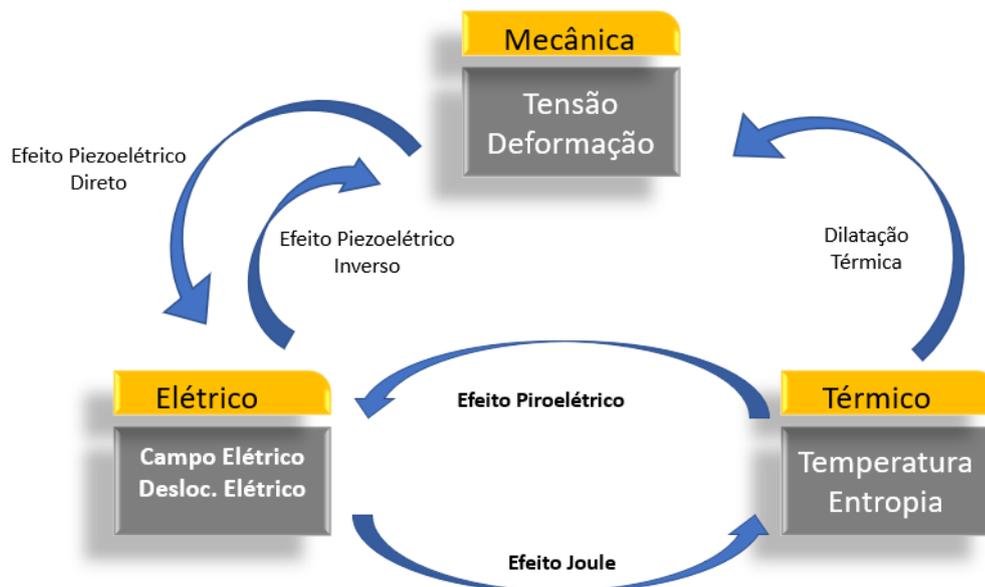
Os resultados apresentam os desvios de impedância em função da temperatura que podem ser quantificados pelo cálculo do RMSD, tanto para temperatura quanto para fase. Utilizando o valor de referência como sendo o parâmetro na temperatura ambiente é verificado a variação devido a ciclagem térmica promovida pelo EMIH. São mostradas as histereses devido a transformação martensítica austenita pelo cálculo do RMSD. Nas curvas apresentadas no trabalho existem as mudanças nas inflexões da curva, que são devidas ao comportamento da transformação de fases na LMF na faixa de temperatura. A técnica EMIH proposta nesta pesquisa possibilitou a obtenção das temperaturas de transformação de fases em materiais com de diferentes geometrias, se tornando assim uma excelente aliada na determinação de temperaturas em LMF ao DSC.

Capítulo 3 - Fundamentação Teórica

3.1. Materiais Inteligentes

Com o desenvolvimento acelerado da eletroeletrônica e com o surgimento de tecnologias cada vez mais avançadas, a procura e as pesquisas por materiais e processos que acompanhem essa evolução tem crescido de forma exponencial. Na tentativa de suprir essa necessidade, foi desenvolvido o conceito de materiais funcionais ou inteligentes, que podem ser definidos como materiais que exibem acoplamento entre vários domínios físicos (LEO, 2008), podendo desempenhar diversas funções, inclusive estrutural, ou seja, quando estimulados podem gerar força, movimento ou pulsos elétricos. A figura 10 mostra uma representação do acoplamento entre alguns dos domínios físicos.

Figura 10 - Esquema funcional da operacionalidade do acoplamento entre os domínios físicos.



Fonte: Adaptado de Leo (2007).

Ao aplicar um material inteligente em uma estrutura, pode considerá-la tal como uma estrutura inteligente. Dessa forma, uma estrutura inteligente tem a habilidade de detectar qualquer alteração no ambiente ou no sistema, localizar problemas em locais críticos, armazenar e processar dados, comandar a ação apropriada para melhorar o seu desempenho e preservar a integridade estrutural, segurança e facilidade de manutenção do sistema (CHENG; JIANG;

LOU, 2008). Logo, uma estrutura inteligente compare-se a um sistema mecatrônico complexo, incorporando tecnologias e características dos materiais conforme sua função e fim desejado, onde se aplica: controle de vibração, controle de posição, controle de forma, monitoramento da integridade estrutural, geração de energia elétrica e outros.

Temos inúmeros tipos e configurações de materiais inteligentes, dentre os mais utilizados os principais tipos podem ser classificados em:

Tabela 1 - Configurações de Materiais Inteligentes

Terminologia	Conceito Básico
Materiais Piezoelétricos:	Polímeros e cerâmicas que reagem à aplicação de diferenças de potencial e/ou deformações impostas;
Ligas com Memória de Forma (LMF):	Polímeros e ligas metálicas que reagem à temperatura e/ou tensão mecânica;
Polímeros Eletroativos (EAP):	Polímeros sensíveis à aplicação de tensão elétrica;
Fluidos Eletro-Reológicos:	Materiais compósitos que reagem ao campo elétrico aplicado, alterando sua reologia;
Fluidos Magneto-Reológicos:	Materiais compósitos que reagem ao campo magnético aplicado, alterando sua reologia.

Fonte: Adaptado Gonçalves et al. (2021)

Tais materiais já estão sendo aplicados em larga escala na indústria e no desenvolvimento de novas peças e equipamentos, substituindo na maioria das vezes, sistemas de alto custo, maior peso e de grande complexidade. Utilizados também como alternativa para sistemas convencionais, alterando a concepção de componentes, potencializando o seu funcionamento e seu poder de atuação (GONÇALVES et al., 2021).

3.2. Ligas com Memória de forma

As Shape Memory Alloys (SMAs) ou Ligas com Memória de Forma (LMF) constituem um grupo de materiais metálicos que possuem a habilidade de recuperar uma forma previamente estabelecida quando sujeito a um procedimento termomecânico ou eletromagnéticos, manifestando deformações residuais nulas ou quase nulas (LAGOUDAS, 2008). Esta característica está associada ao mecanismo de transformação de fase reversíveis particular desses materiais. Os materiais com memória de forma mais utilizados são as ligas formadas por Níquel e Titânio (NiTi), como consequência de maiores deformações e maior estabilidade serem atingidas com esta composição. Eles foram inicialmente observados no Naval Ordnance Laboratory (NOL), o que levou a serem denominados de Nitinol (LAGOUDAS, 2008). Apesar da popularidade dessas ligas, em algumas aplicações é inserido

um terceiro elemento (como o cobre na liga de Ti-45Ni-5Cu) para obter uma relação entre resistência elétrica e temperatura mais linear, isto decorre da eliminação da fase intermediária (fase R) (LIU et al., 1997).

As transformações de fase de LMFs podem seguir dois caminhos contrapostos, por vez denominados: transformação direta e transformação inversa (ou reversa). Para a transformação direta, vê-se a transformação da fase austenita para a martensita ($A \rightarrow M$), isto é, quando se resfria a LMF dentro de uma determinada faixa de temperatura, podendo variar conforme a formação da liga. Para a transformação inversa (ou reversa), vê-se o caminho oposto, marcado pelo aquecimento sofrido pela LMF, ou seja, a transformação inicia-se na fase martensítica em direção a fase austenítica ($M \rightarrow A$).

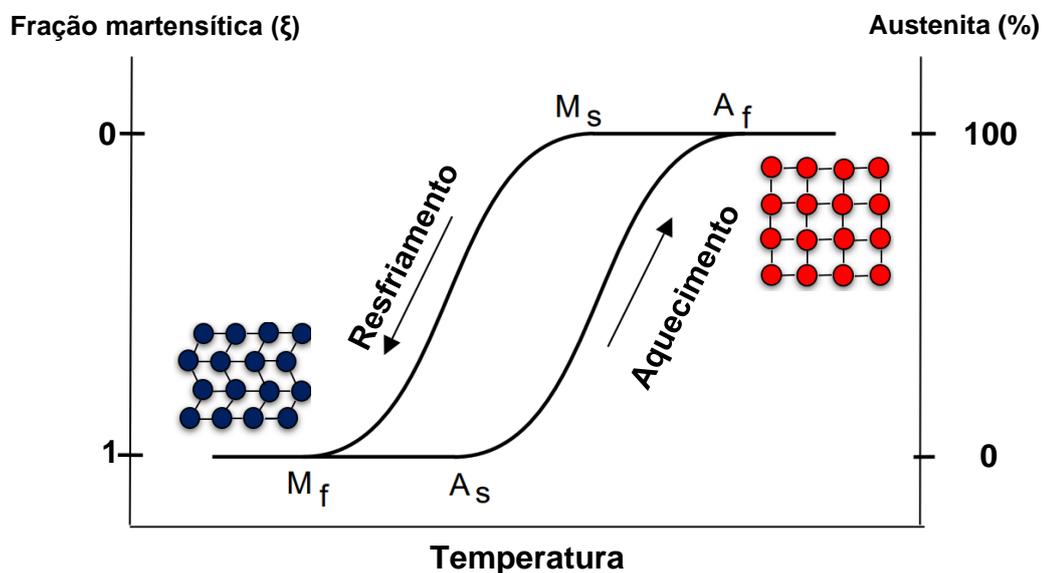
Pode-se afirmar que a Austenita (A) é a fase mais organizada em nível microscópico, em equilíbrio a temperaturas mais altas e baixas tensões, possui uma estrutura cristalina de alta simetria geralmente na forma cúbica, chamada de B2 para as ligas Ni-Ti. Essa fase tende a ser mais rígida e com menor amortecimento em relação a fase martensítica. A martensita (M), fase de menor simetria, permite a acomodação de sua rede cristalina de diversas formas quando deformada, desta maneira apresenta maiores níveis de ductilidade e amortecimento. A literatura apresenta a martensita como induzida por temperatura ou por tensão, quando induzida por temperatura exibe uma estrutura cristalina maclada (*twinned martensite*) estável a baixas tensões e temperaturas. Quando submetida a uma tensão, produz uma estrutura não-maclada ou demaclada (*detwinned martensite*) estável a altas tensões. Existe uma fase intermediária chamada de fase-R com estrutura cristalina romboédrica, sua presença está associada à composição química da liga, sendo favorecida pela participação de alumínio ou ferro, porém ela normalmente desaparece com tratamentos térmicos a elevadas temperaturas.

No momento onde a qual transformação reversa é alcançada por aquecimento gradual, surge uma variável de estado importante, proposta pela letra grega ξ , a fração de martensita. Considerando a natureza não difusiva da transformação martensítica, a lei cinética para mudança de fase, define a fração martensítica ξ ($0 \leq \xi \leq 1$) em função da temperatura, como a porcentagem de estrutura martensítica em relação ao total do material, ou seja, valores de $\xi = 0$ e $\xi = 1$ representam uma liga puramente austenítica e integralmente martensítica, respectivamente.

Pode ser visto na figura 11 uma representação do comportamento da transformação martensítica em função da temperatura. É possível verificar quatro temperaturas bem específicas com relação às transformações de fase. As terminologias empregadas foram definidas por Otsuka e Wayman e inserida na norma ASTM F 2005-5. Logo, durante o

resfriamento, ao se reduzir até uma determinada temperatura sem aplicação de esforço mecânico, a fase austenítica começa a se transformar em martensita, essa temperatura recebe a denominação M_s (*Martensite start*). No decurso da transformação atinge-se a temperatura M_f (*Martensite finish*) à qual o material se torna 100% martensítico. No procedimento reverso, quando a temperatura aumenta, uma liga previamente martensítica inicia a conversão em austenita à temperatura, A_s (*Austenite start*), concluindo este processo à temperatura A_f (*Austenite finish*).

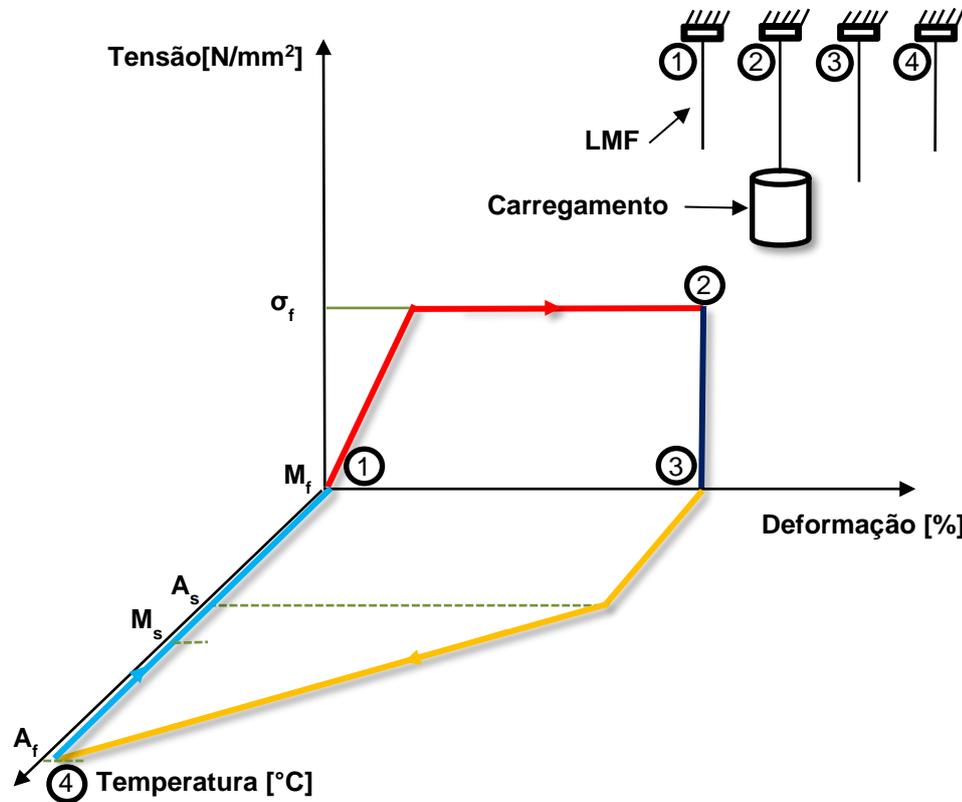
Figura 11 - Evolução da fração de martensita (ξ) com a temperatura em LMF



Fonte – Adaptado de Teh (2008)

O efeito memória de forma (EMF) é observado quando uma LMF sofre uma deformação extensa no estado martensítico e ao cessar a carga, grande parte desta deformação se mantém, como uma deformação plástica convencional. No entanto, ao submeter a LMF a um aumento de temperatura para valores superiores ao da temperatura A_f , o material sofre transformação de fase ($M \rightarrow A$) e recupera esta deformação, que é assim considerada quasiplástica. Resfriando-a novamente a LMF para abaixo da temperatura M_f , nenhuma deformação ocorre e a LMF terá simplesmente retornado ao seu estado martensítico original devido à ocorrência da transformação direta ($A \rightarrow M$). A Figura 12 mostra um ciclo termomecânico de tensão / deformação / temperatura que descreve o EMF, destacando também as estruturas cristalográficas relacionados a cada etapa do ciclo e as condições críticas de transformação de fase (temperatura e tensão).

Figura 12 - Ciclo de carregamento termomecânico representando as transformações da LMF e seu comportamento de memória de forma



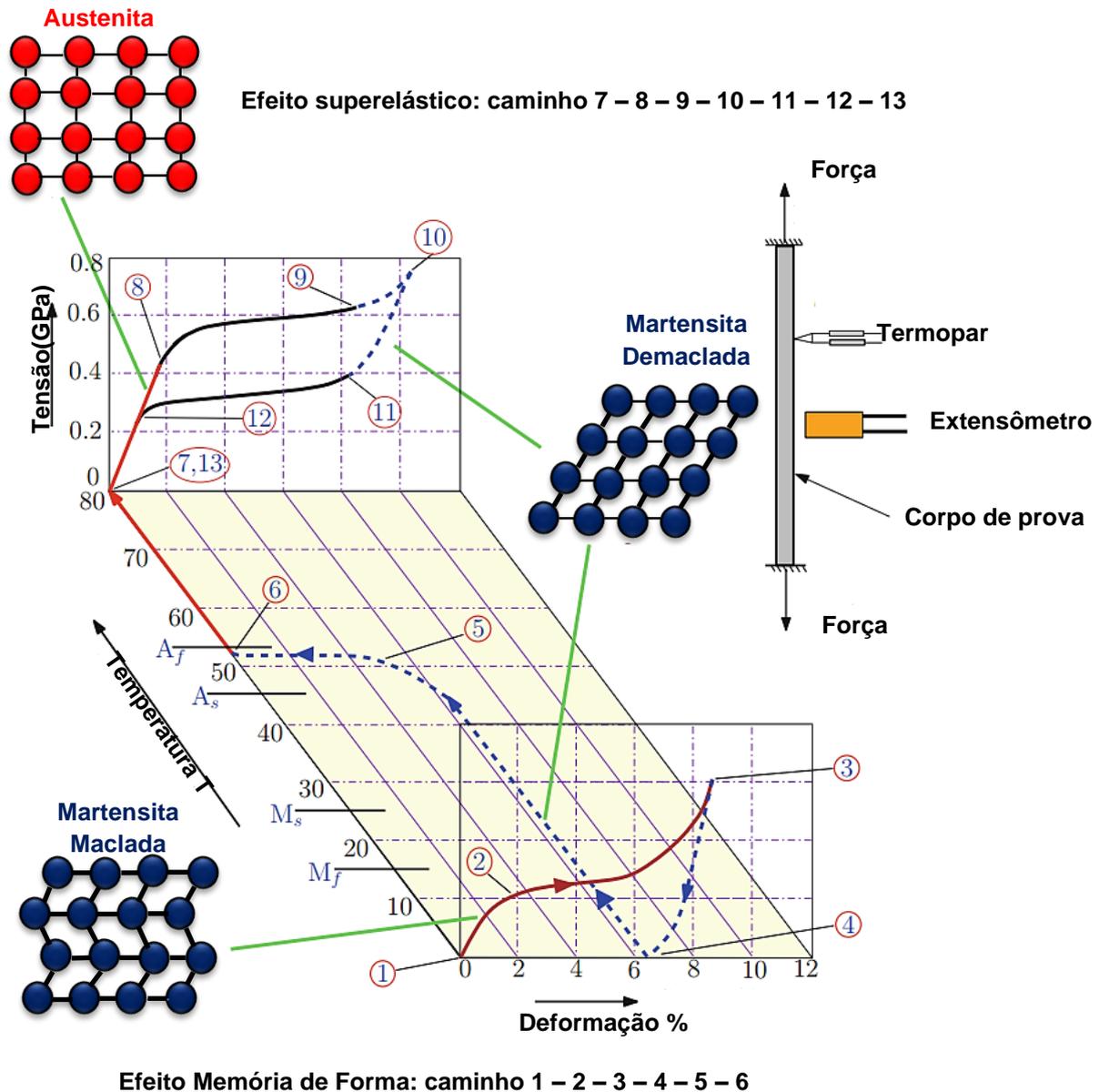
Fonte – Adaptado Czechowicz e Langbein (2015)

Uma das ocorrências visíveis de materiais que possuem memória de forma mais pertinentes é conhecida como superelasticidade ou pseudoelasticidade. A superelasticidade (SE) é uma propriedade acoplada ao EMF, ou seja, as LMF apresentam ambos os efeitos. A SE está intrinsecamente conectada com o EMF. A priori, ambos são perceptíveis na mesma amostra, dependendo da temperatura em que se percebe a deformação e o tratamento termomecânico anterior. Conforme a figura 13 ilustra, o EMF ocorre após uma deformação em temperatura abaixo de M_f , seguido de aquecimento acima de A_f , enquanto SE ocorre acima de A_f e abaixo de M_d . Na faixa intermediária, entre M_f e A_f , o EMF e SE “disputam” entre si e podem ocorrer parcialmente, dependendo da estrutura inicial do material e da condição térmica experimentada.

Em LMF o mecanismo de cisalhamento mais comum é a maclagem. Assim, quando o material se encontra na fase martensita e é deformado, os planos de maclas são deslocados

provocando um movimento relativo entre os átomos, porém, as ligações atômicas são mantidas.

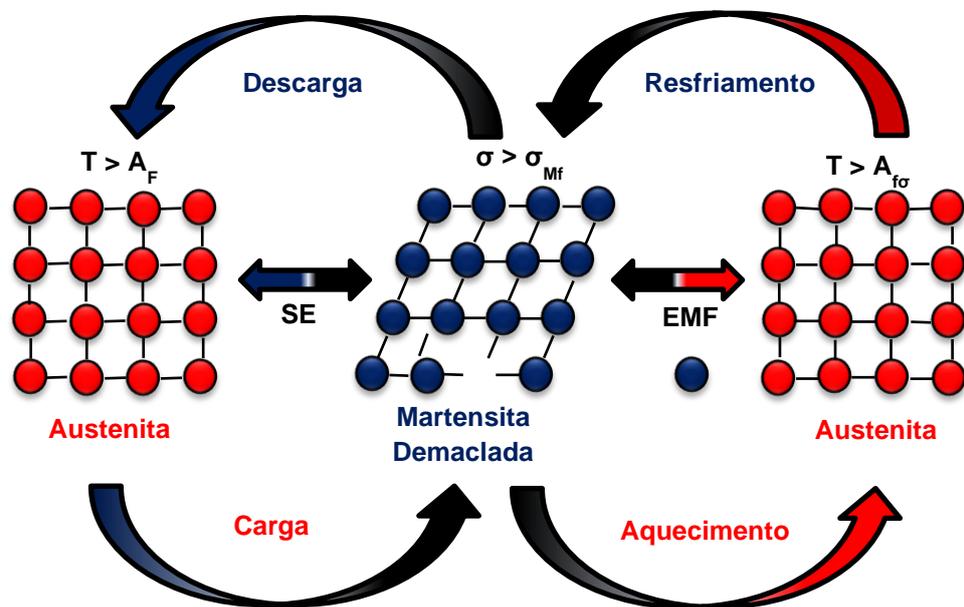
Figura 13 - Relação tridimensional da tensão, deformação e temperatura para o comportamento mecânico das LMF.



Fonte – Adaptado (RAO, ASHWIN AND SRINIVASA, ARUN RAMASWAMY AND REDDY, 2015)

Este processo permite a reversibilidade da estrutura cristalográfica quando aquecido para a fase austenita. Geralmente essa fase tem estrutura cristalina cúbica (B2), já a estrutura da martensita é muito dependente da composição. Para uma liga equiatômica de NiTi a mais comum é a monoclínica (B19') (LAGOUDAS, 2008).

Figura 14 - Diagrama esquemático do EMF criado a partir da reversão da martensita induzida por tensão



Fonte - Adaptado (EMILIAVACA et al., 2018)

Contemporaneamente observa-se uma intensificação das LMF como uma importante classe de material em Engenharia. Na tabela 2, (MEHTA; GUPTA, 2019) resumem as principais famílias de LMF.

Tabela 2 - Composição das Principais Famílias de LMF esquemático do LMF

Ligas				
Ferro	Cobre	Níquel	Altas temperaturas	Magnéticas
Fe-Mn-Si	Cu-Zn-Al Cu-Al-Ni Cu-Al-Ni-Mn Cu-Sn	Ni-Ti Ni-Ti-Cu Ni-Ti-Pd Ni-Ti-Fe Ni-Ti-Nb Ni-Fe-Ga Ni-Ti-Co	Ti-Ni-Pd	Ni-Mn-Ga Fe-Pd Ni-Mn-Al Fe-Pt Dy Tb LaSrCuO Re-Cu Ni-Mn-In Co-Ni-Ga
			Ti-Ni-Pt	
			Ni-Ti-Hf	
			Ni-Ti-Zr	
			Zr-Rh	
			Zr-Cu	
			Zr-Cu-Ni-Co	
			Zr-Cu-Ni-Co-Ti	
			Ti-Mo	
			Ti-Nb	
			Ti-Ta	
			Ti-Au	

			Unb Ta–Ru Nb–Ru Fe–Mn–Si	
--	--	--	-----------------------------------	--

Fonte – Mehta e Gupta (2019)

3.3. Transdutores Piezoelétricos

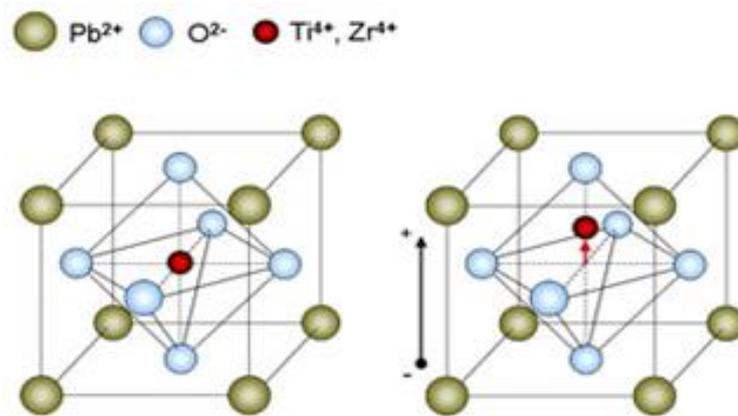
Os materiais piezoelétricos são cerâmicas que se classificam como materiais inteligentes. Um material piezoelétrico é um transdutor eletromecânico e devido a essa característica o material é muito eficiente para o uso em aplicações dinâmicas envolvendo supressão de vibrações, impacto mecânico e sensoriamento. Estes foram descobertos através irmãos Curie, por volta de 1880, enquanto observavam alguns cristais de quartzo que apresentavam uma polarização elétrica quando submetidos a uma tensão mecânica, o efeito que rege os materiais piezoelétricos é denominado de piezo eletricidade, que significa eletricidade por pressão (ERTÜRK, 2017).

Os materiais que constituem os transdutores piezoelétricos podem ser classificados em diferentes grupos, são eles: cristais de quartzo, cristais hidrossolúveis, monocristais piezoelétricos, semicondutores piezoelétricos, cerâmicas piezoelétricas, polímeros piezoelétricos e compósitos piezoelétricos. Dentre os grupos apresentados, os que mais se destacam são as cerâmicas e os polímeros piezoelétricos. As cerâmicas se sobressaem por apresentarem uma maior variedade de formas e de propriedades, em parte devido ao seu processo de fabricação que é a sinterização, e as mais utilizadas são as cerâmicas a base de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) e de Titanato de Bário. Os polímeros também são muito utilizados, principalmente em aplicações que envolvam grandes deformações ou haja a necessidade de um material flexível, e o mais comum é o Polifluoreto de Vinilideno (PVDF) (Venet e Pereira, 2004-2).

No âmbito microscópico o efeito piezelétrico tem sua origem decorrente do deslocamento de cargas iônicas dentro da estrutura cristalina. Na ausência de uma tensão mecânica externa, a distribuição de cargas dentro do cristal é simétrica e o momento dipolo resultante é nulo. Com a aplicação de uma tensão externa, as cargas serão deslocadas e sua distribuição no interior do cristal não mais será simétrica (JORDAN, 2001). A polarização é

espontânea nas células unitárias das cerâmicas de PZT em temperaturas abaixo de Curie devido a assimetria da estrutura cristalina, onde cada cristal possui momento de dipolo. Essa assimetria é caracterizada pela estrutura tetragonal ortorrômbica, enquanto que acima da temperatura de Curie a estrutura passa a ser cúbica e o momento dipolo nulo fazendo com que o material perca suas propriedades piezoelétricas (PEREIRA, 2005). Esse fenômeno pode ser observado na Figura 15.

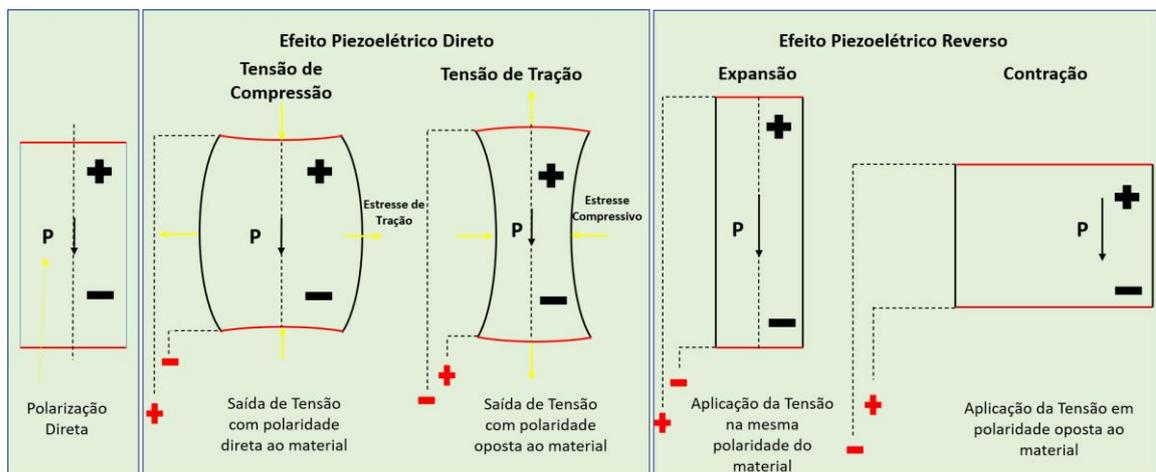
Figura 15 - Estrutura Perovskita simétrica e assimétrica.



Fonte: Venet e Pereira (2004-1).

A existência desse dipolo faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e/ou gere um deslocamento elétrico quando submetido a uma deformação mecânica.

Figura 16 - Representação dos efeitos direto e inverso em transdutores piezoelétricos.



Fonte: Wing adaptado (2003).

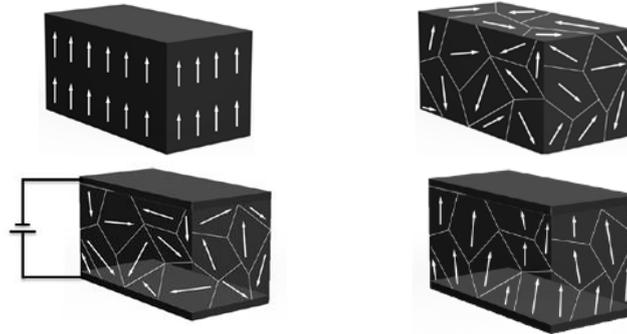
Essa característica do material de apresentar uma diferença de potencial em seus terminais quando submetido a uma tensão mecânica é chamado de efeito direto, onde o contrário também é verdadeiro. Ou seja, se aplicarmos uma diferença de potencial em seus terminais, o elemento piezoelétrico retornará com uma deformação mecânica, que denominamos de efeito inverso. Ambos os efeitos podem ser demonstrados no esquema apresentado na figura 16.

Porém, para que seja manifestada variações macroscópicas se faz necessário uma orientação preferencial do arranjo comum como a polarização. Essa polarização é obtida por meio da aplicação de um elevado campo elétrico direcionado a cerâmica, enquanto a mesma está sendo exposta a uma fonte de calor, a uma temperatura acima da temperatura de *Curie* do material. Ao aplicar o calor, as moléculas podem movimentar - se com liberdade e as forças geradas pelo campo elétrico forçam os dipolos a alinharem - se de acordo com a direção do campo elétrico externo aplicado. Vale ressaltar, que a polarização chega ao fim com o tempo e uso, inutilizando o material, porém, esse processo pode levar muitos anos.

Caliò et al. (2014) afirma que, em um monocristal os eixos de todos os portadores de carga exibem uma característica unidirecional, apresentando simetria mesmo se for dividido em pedaços menores. Enquanto que uma cerâmica policristalina é caracterizada por diferentes regiões do material com diferentes eixos de direção. Ela é assimétrica, isso significa que se o material for dividido em diferentes partes, as suas cargas não estariam na mesma direção resultante. Uma representação de uma estrutura cerâmica monocristalina e uma policristalina estão mostradas na figura 17.

Para as cerâmicas policristalina, a qual necessitam ser polarizadas, pelo método já apresentado anteriormente, para que os portadores de carga alinhem - se em uma direção preferencial e possa exibir os efeitos piezoelétricos desejados. Os efeitos causados pela polarização de uma estrutura policristalina estão demonstrados na figura 17. Para esse trabalho, foi considerado a linearidade do comportamento dos materiais piezoelétricos baixos níveis de tensão/deformação mecânicas e baixos campos de tensão elétrica. As propriedades eletromecânicas desses materiais realmente se comportam de forma linear, porém eles podem apresentar fortes não linearidades, como nos casos de campo elétrico elevado e se altos níveis de tensão mecânica forem aplicados. Portanto, como na maioria de suas aplicações, consideraremos que os piezoelétricos estarão operando sobre baixos níveis de tensão mecânica e de campo elétrico.

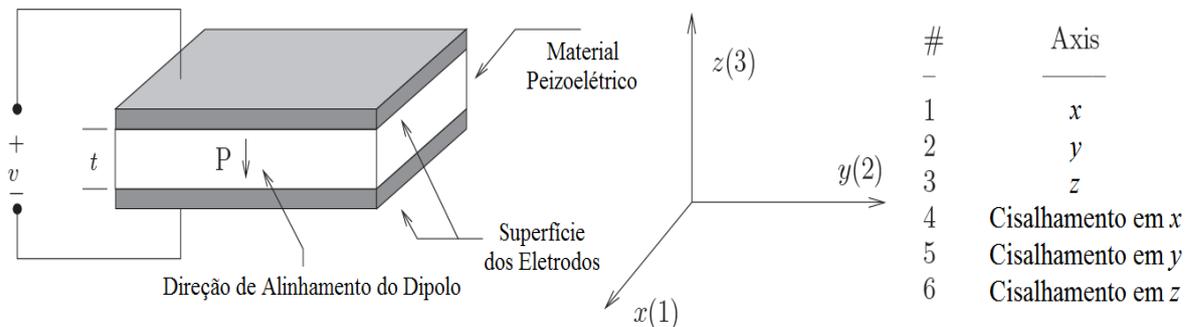
Figura 17 - Estrutura monocristal na e policristalina.



Fonte: Calìo et al. (2014).

Para Moheimani (2006), as equações constitutivas que descrevem as propriedades piezoelétricas do material são baseadas no pressuposto de que a deformação total no transdutor é a soma da deformação mecânica induzida pela tensão mecânica e da deformação de atuação controlável, causada pela diferença de potencial aplicada. Para essas equações, os eixos cartesianos são identificados por números em vez de letras, como mostrado na Figura 18, junto com o diagrama do piezoelétrico. Ao eixo 3 é atribuído a direção de polarização inicial do transdutor, onde os eixos 1 e 2 se encontram no plano perpendicular ao eixo 3.

Figura 18 - Representação do piezoelétrico e nomenclatura utilizada para os eixos



Fonte: Moheimani e Fleming (2006).

As equações que descrevem o comportamento eletromecânico para um material piezoelétrico linear (IEEE *Standard on Piezoelectricity*, 1987) podem ser descritas na forma:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^E \cdot \sigma_j + d_{mi} \cdot E_m \tag{1}$$

$$D_m = d_{mi} \cdot \sigma_i + e_{ik}^\sigma \cdot E_k \tag{2}$$

Para os índices $i, j = 1, 2, \dots, 6$ e $m, k = 1, 2, 3$, se referem as diferentes direções dentro do sistema de coordenadas do material. As Equações (3) e (4) para o transdutor utilizado como sensor podem ser reescritas como:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^D \cdot \sigma_j + g_{mi} \cdot D_m \quad (3)$$

$$E_m = g_{mi} \cdot \sigma_i + \beta_{ik}^\sigma \cdot D_k \quad (4)$$

Onde,

σ = vetor de tensão mecânica (N/m^2);

ε = vetor de deformação (m/m);

E = vetor de campo elétrico aplicado (V/m);

e = permissividade (F/m);

d = matriz das constantes de deformação piezoelétrica (m/V);

S = matriz dos coeficientes de compliança (m^2/N);

D = vetor de deslocamento elétrico (C/m^2);

g = matriz das constantes piezoelétricas (m^2/C);

β = componente de não permissividade (m/F);

Os sobrescritos D, E e σ representam medições feitas com deslocamento elétrico constante, campo elétrico constante e tensão mecânica constante, respectivamente.

As Equações 1 e 3 representam o efeito piezoelétrico inverso, descrevendo o comportamento do piezoelétrico quando utilizado como atuador. As Equações 2 e 4, por sua vez, representam o efeito piezoelétrico direto, caso ao qual o transdutor está sendo utilizado como sensor. O efeito inverso é frequentemente utilizado para determinar os coeficientes piezoelétricos. Essas equações também podem ser expressas de forma matricial. Assumindo que o transdutor é polarizado ao longo do eixo 3, e tratando o material piezoelétrico como isotrópico ao longo de sua seção transversal, podemos obter a forma matricial das equações na forma:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & e_{11}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde a constante de deformação piezoelétrica (d) é definida como a razão entre a deformação livre desenvolvida em relação ao campo elétrico aplicado. O subscrito d_{ij} implica que o campo elétrico é aplicado ou a carga elétrica é medida na direção i para um deslocamento ou força aplicada na direção j .

Nessa etapa do trabalho é importante introduzirmos o conceito de Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (k_{ij}). O coeficiente piezoelétrico representa a habilidade do material piezocerâmico de transformar energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. O índice ij indica que a tensão ou a deformação estão sendo aplicados na direção j , enquanto os eletrodos encontram-se perpendiculares a direção i , que seria a direção de polarização.

Existem diversas formas de mensurar a magnitude dessa constante. Uma possibilidade é reescrever o coeficiente de acoplamento em função de outras constantes piezoelétricas. Em particular,

$$k_{ij}^2 = d_{ij}^2 / S_{ij}^E \cdot e_{ij}^\sigma = g_{ij} \cdot d_{ij} \cdot E_P \quad (7)$$

Onde E_P é o módulo de elasticidade do material piezoelétrico.

Quando uma força é aplicada a um transdutor piezoelétrico, dependendo se o dispositivo está em circuito aberto ou fechado, esperamos observar diferentes valores de rigidez. Em particular, se os eletrodos estão em curto circuito, o dispositivo apresentará uma menor rigidez. Isto se dá, devido ao fato de que após a aplicação de uma força externa, as cargas elétricas de polaridades opostas acumuladas nos eletrodos irão se anular mutuamente. Portanto, nenhuma energia elétrica será armazenada no piezoelétrico.

Dessa forma, se denotarmos a rigidez de curto-circuito e a rigidez de circuito aberto como sendo K_{SC} e K_{OC} , respectivamente, pode-se provar que:

$$K_{OC}/K_{SC} = 1/1 - k^2 \quad (8)$$

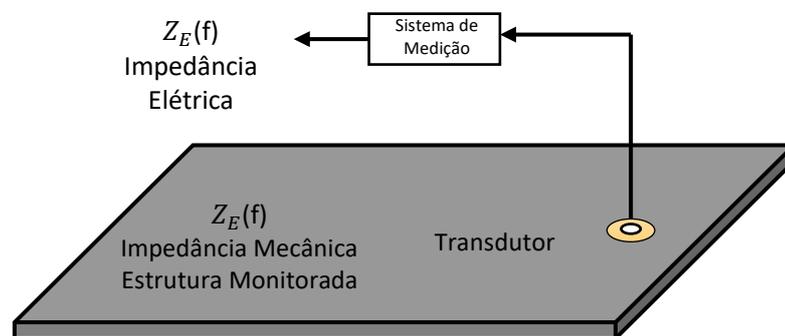
Para mais detalhes sobre a obtenção dessas equações, consultar Moheimani e Fleming (2006), IEEE Standard on Piezoelectricity (1987), Imaoka (1999) e Vicente, Steffen e Savi (2016).

3.4. Princípio da Impedância Eletromecânica

A técnica de impedância eletromecânica (EMI) permite detectar alterações estruturais em altas frequência. As variações de impedância mecânica (danos ou variações estruturais) da estrutura hospedeira são determinadas através de uma correlação obtida por medições de impedância elétrica em piezo-transdutores (PZT). A quantificação de qualquer alteração é realizada através de índices calculados entre uma condição estrutural saudável e um estado de monitoramento. Algumas aplicações mostraram a viabilidade da técnica em aplicações de bio-monitoramento.

O monitoramento da integridade estrutural de sistemas mecânicos baseado no método da Impedância Eletromecânica utiliza pequenos transdutores piezelétricos acoplados na estrutura a fim de monitorar mudanças de rigidez, amortecimento e/ou massa. As cerâmicas piezelétricas (PZTs) apresentam uma relação aproximadamente linear entre o campo elétrico e a deformação (para baixas intensidades do campo elétrico). Sendo assim, grande parte das aplicações práticas é restrita a leis lineares (JÚNIOR, 2008). Uma configuração simplista do método da impedância EMI é demonstrada na figura 19, em que é apresentado um transdutor piezelétrico fixado a uma estrutura a ser monitorada.

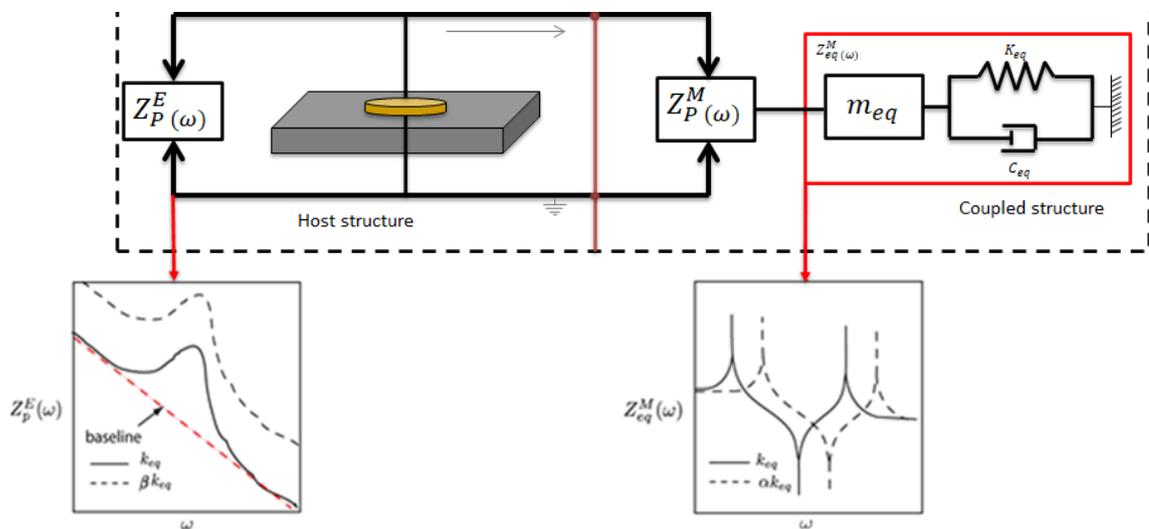
Figura 19 - Configuração básica do método da impedância EMI.



Com o transdutor piezoelétrico fixado na estrutura, conforme pode ser observado na figura 1, o sistema de medição excita o transdutor em uma frequência apropriada (f) enquanto, simultaneamente, mede sua impedância elétrica ($Z_E(f)$). Os dispositivos transdutores mais

utilizados no método da impedância (EMI) são as cerâmicas de PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate* – Titanato Zirconato de Chumbo) (também conhecidas como sensores ativos de pastilha piezelétrica (PWAS – *Piezoelectric Wafer Active Sensor*)), (GIURGIUTIU, 2010) compósitos de macro fibra (MFC – *Macro Fiber Composite*) (SHAHAB; ERTURK, 2017) e diafragmas piezelétricos (DE FREITAS et al., 2017). A figura 20 abaixo mostra Modelo eletromecânico que descreve o processo de medição da assinatura de impedância. A figura 20 apresenta modelo eletromecânico que descreve o processo de medição da assinatura de impedância.

Figura 20 - Modelo eletromecânico que descreve o processo de medição da assinatura de impedância



Esses transdutores são leves, pequenos e finos, permitindo, então, que vários transdutores sejam fixados às estruturas a serem monitoradas, sem alterar significativamente as propriedades mecânicas das mesmas. A relação entre a impedância elétrica ($Z_E(f)$) de um transdutor piezelétrico e a impedância mecânica ($Z_S(f)$) de uma estrutura tem sido amplamente estudada e, com base nas equações constitutivas do material piezelétrico (MEITZLER et al., 1988), muitos pesquisadores têm proposto vários modelos eletromecânicos. Uma versão simplificada de um dos modelos unidimensionais mais conhecidos e comumente utilizado na literatura para mostrar a interação entre as propriedades elétricas e mecânicas no método da impedância EMI, utilizando-se uma cerâmica de PZT, é dada por (LIANG; SUN; ROGERS, 1997).

$$Z_E(f) = \frac{1}{j2\pi fC} \left(1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T} \frac{Z_S(f)}{Z_S(f) + Z_P(f)} \right)^{-1} \quad (9)$$

Onde $(Z_E(f))$ é a impedância elétrica do transdutor na frequência f ; $(Z_P(f))$ é a impedância mecânica do transdutor; $(Z_S(f))$ é a impedância mecânica da estrutura monitorada; C é a capacitância estática do transdutor; d_{31} , S_{11}^E e ϵ_{33}^T são as constantes piezoeletrica, de elasticidade (compliance) e dielétrica, respectivamente, do material piezoeletrico, onde os sobrescritos T e E indicam tensão mecânica constante e campo elétrico constante, respectivamente, e os índices 1 e 3 representam os eixos do sistema de coordenadas naturais do material piezoeletrico para uma conjuntura unidimensional; e j é a unidade imaginária. De acordo com a Equação (9), qualquer variação na impedância mecânica $(Z_S(f))$ da estrutura monitorada causada por danos, resulta em uma variação correspondente na impedância elétrica $(Z_E(f))$ do transdutor. Considerando a dificuldade em se obter a impedância mecânica da estrutura, no método da Impedância Eletromecânica mede-se primeiramente a impedância elétrica do sensor PZT.

Considerando que suas propriedades não variam ao longo do tempo, mudanças na impedância elétrica estarão relacionadas diretamente com alterações na impedância mecânica, que por sua vez é afetada pela presença de danos. A impedância mecânica (Z_m) e impedância elétrica do sensor PZT (Z_e) são dadas pelas equações (10) e (11). Onde $F(f)$ a força e $q(f)$ a velocidade; $V(f)$ e $I(f)$ são a tensão e a corrente elétrica, respectivamente; todas estas grandezas aparecem em função da frequência (f).

$$Z_m = \frac{F(f)}{q(f)} \quad (10)$$

$$Z_E = \frac{V(f)}{I(f)} \quad (11)$$

Portanto, danos estruturais podem ser detectados e quantificados comparando-se duas assinaturas de impedância elétrica por meio do cálculo dos índices de danos. A impedância elétrica é complexa, e a parte real geralmente é a utilizada para calcular os índices de danos, uma vez que é mais sensível ao dano e menos sensível às variações de temperatura (FARRAR; WORDEN, 2012). Em geral, a variação de temperatura altera a resposta dinâmica do conjunto PZT/Estrutura e, como consequência, modifica o valor da impedância elétrica medida no sensor/atuador PZT, muitas técnicas têm sido propostas para melhorar o desempenho de sistemas SHM baseados na EMI (KOO et al., 2009)

Mas a técnica da EMI apresenta desvantagens, uma delas que podemos destacar, é a variação de temperatura ambiente que afeta as propriedades da cerâmica piezoeletrica e da

estrutura, e dificultam as aplicações em estruturas reais. Dessa forma, as variações de temperatura afetam a resposta dinâmica de uma estrutura, provocando mudanças nos resultados da medição da impedância elétrica em um transdutor PZT acoplado a essa estrutura, podendo levar a um falso dano (falso positivo), causado somente pelo efeito de temperatura. (BAPTISTA; ON; 2009, 2009; KOO et al., 2009; SUN et al., 1995).

3.5. Métricas para Detecção de Danos

Em termos gerais, a identificação de danos utilizando a técnica da EMI, é realizada por meio da comparação da assinatura de impedância elétrica no estado íntegro, condição inicial sem danos, (baseline) e a assinatura em um estado desconhecido denominado assinatura de monitoramento. Comparando as assinaturas de baseline e de monitoramento, através de índices estatísticos de falha métrica, é possível identificar o dano. Os índices mais utilizados na literatura são o desvio da raiz média quadrática Root Mean Square Deviation (RMSD), e a métrica do desvio do coeficiente de correlação Correlation Coefficient Deviation Metric (CCDM). Geralmente, o índice CCDM é mais sensível à mudança no formato da assinatura de impedância e o RMSD é mais sensível às variações das amplitudes da assinatura de impedância. Quanto menores os valores das métricas, mais “próximas” são as assinaturas. O índice RMSD é baseado na distância Euclidiana entre as duas assinaturas (GIURGIUTIU, 2010; LIANG; SUN; ROGERS, 1997), Esse índice sofreu várias adaptações e modificações por muitos pesquisadores, um dos mais utilizados é o dado na equação abaixo:

$$RMSD = \sum_n^N \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h}^2}} \quad (12)$$

$Z_{n,h}$ a impedância elétrica do transdutor com a estrutura íntegra

$Z_{n,d}$ a impedância após a ocorrência de um dano, ambas medidas na frequência n

N é o número total de amostras

Já o índice CCDM é obtido pela Equação abaixo:

$$CCDM = 1 - Cc \quad (13)$$

Onde CC é o coeficiente de correlação, dado pela Equação.

$$C_c = \left| \frac{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)(Z_{n,d} - \bar{Z}_d)}{\sqrt{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)^2} \sqrt{\sum_n^N (Z_{n,d} - \bar{Z}_d)^2}} \right| \quad (14)$$

Onde:

Z_h e Z_d são as médias da impedância na faixa de frequência considerada, obtidas antes e depois do dano, respectivamente, dadas pela equação 15:

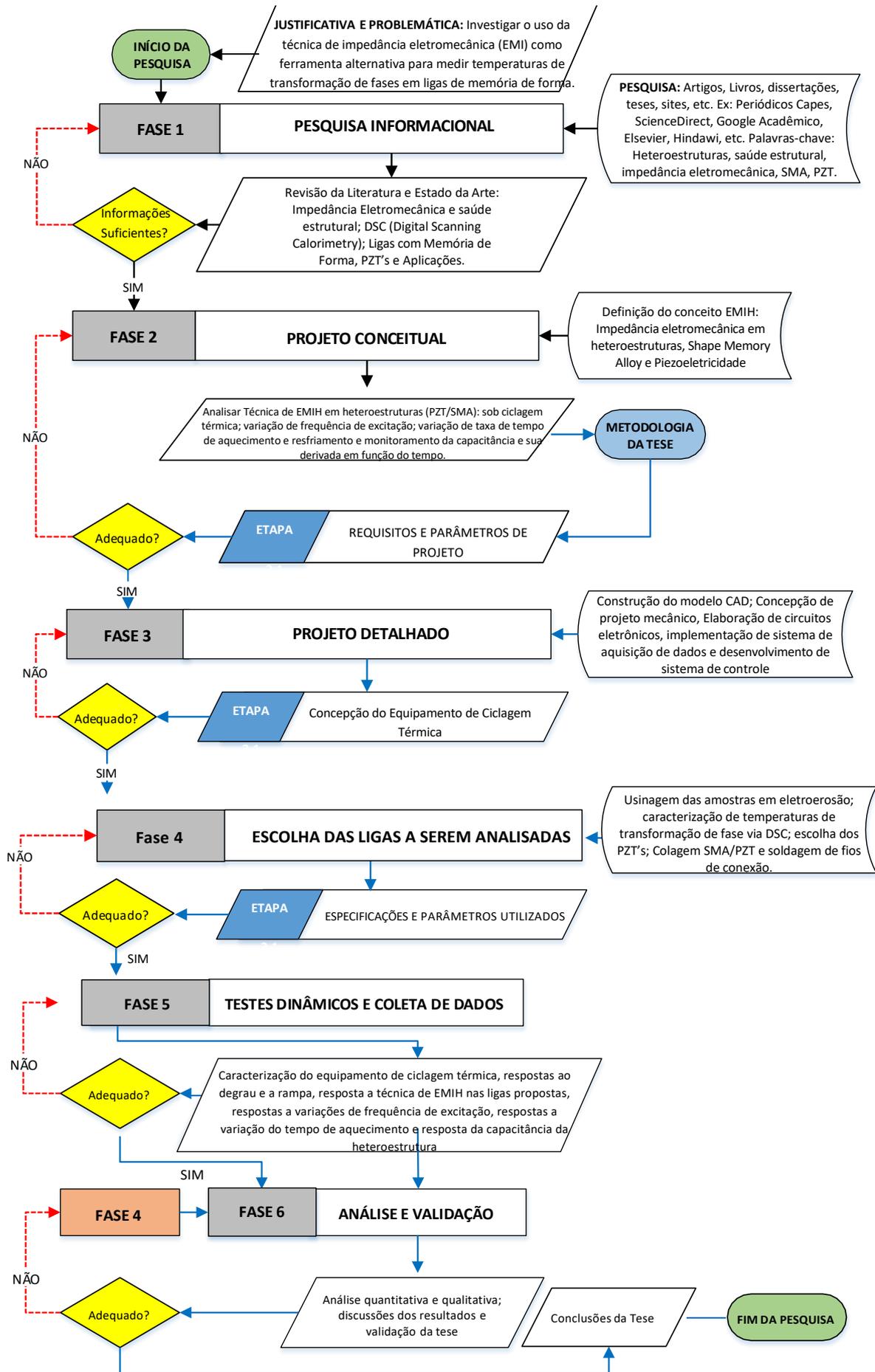
$$\bar{Z}_h = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,h} \quad \bar{Z}_d = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,d} \quad (15)$$

$Z_{,n,h}$ e $Z_{,n,d}$ podem ser tanto o módulo da impedância elétrica do transdutor como a parte real (resistência) ou imaginária (reatância). Embora alguns pesquisadores recomendem o uso da parte real, (BHALLA et al., 2018) ainda não há um consenso na literatura de qual componente da impedância é mais adequada. Os índices RMSD e CCDM são calculados para uma faixa de frequência que contém as frequências naturais da estrutura, mais sensíveis ao dano. Para selecionar essa faixa de frequência é utilizada uma metodologia observando os dados obtidos em uma quantidade considerável de testes. Vale salientar que as frequências dessa faixa selecionada devem ser altas, o suficiente para que tenha um comprimento de onda menor que o tamanho do dano que se deseja detectar (NOKES; MECHANICS; 1993, 2010). Frequências elevadas, entretanto, limitam a região de sensibilidade do transdutor, mas esse efeito pode ser compensado para a localização de dano em sistemas que utilizam rede de transdutores (PARK et al., 2003).

Capítulo 4 - Materiais e Métodos

O método para indicar as temperaturas de transformação de fases em ligas de SMA utilizado neste trabalho foi dado pela técnica de impedância eletromecânica em heteroestrutura (EMIH). Assim, a detecção desse fenômeno é realizada por um material piezoelétrico funcionando como sensor acoplado a uma amostra de SMA. A impedância elétrica desse sensor é o parâmetro medido para examinar o comportamento em função da variação da temperatura da heteroestrutura (SMA acoplado ao PZT), e conseqüentemente extrair informações de temperaturas de transformação de fase da liga em questão. Apresenta-se neste tópico as seis (06) principais fases aplicadas na pesquisa conforme ilustrado no fluxograma da Figura 21. O detalhamento das fases é descrito a seguir.

Figura 21 - Fluxograma do Experimento



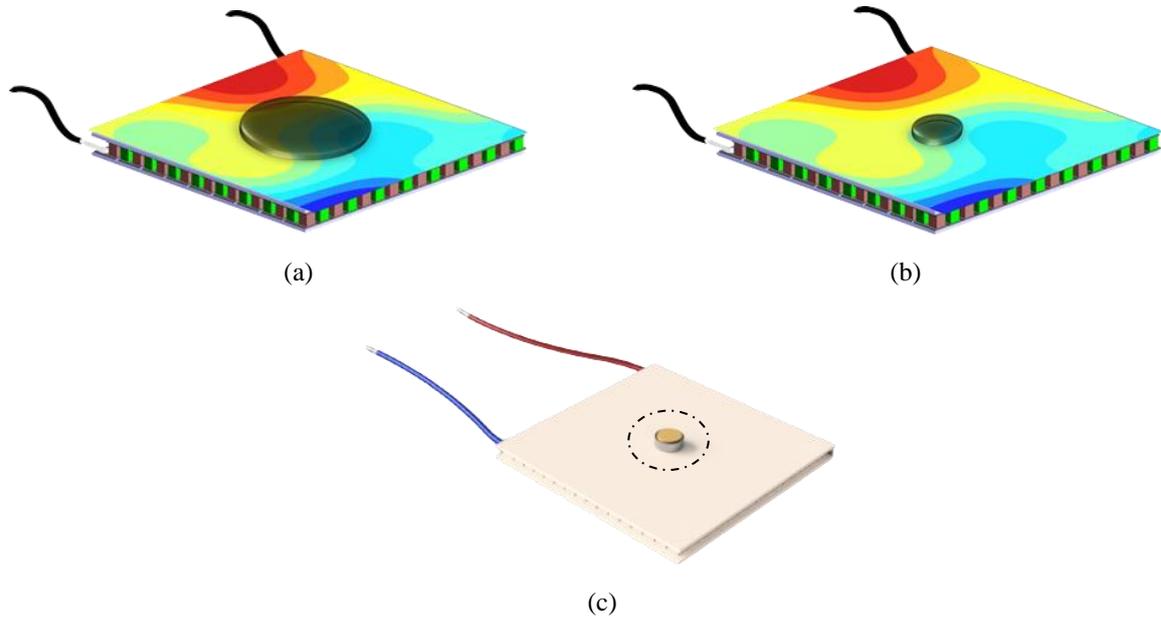
O início da pesquisa se dá com a justificativa e problemática descrito nesse texto anteriormente e recolocada no fluxograma da figura 21. A fase um é uma pesquisa informacional a respeito do tema, abarcando uma revisão de literatura e estado da arte. A fase 2, trata-se de um projeto conceitual a partir da definição do conceito de EMIH (impedância eletromecânica em heteroestruturas). Também aborda os objetivos específicos e como serão obtidos os resultados para alcançar essas metas. Na fase 3, se coloca quais aparatos e parâmetros a serem utilizados na pesquisa. Projeto e concepção do aparato técnico instrumental para obtenção dos dados a serem analisados. A fase 4, coloca-se na obtenção e preparo dos corpos de prova das ligas propostas a serem analisados e parâmetros de ensaios. Também aborda a escolha dos PZTs e preparação das heteroestruturas. Na fase 5, é realizado os testes dinâmicos e coleta de dados em ensaios propostos. Por fim, na fase 6 é realizado análises e validação dos resultados obtidos. Caso seja encontrado inconformidade, retorna se a fase 4, para rever a preparação das heteroestruturas e parâmetros de ensaios.

4.1 Projeto Detalhado

4.1.1 Projeto e Concepção da Máquina de Ciclagem Térmica

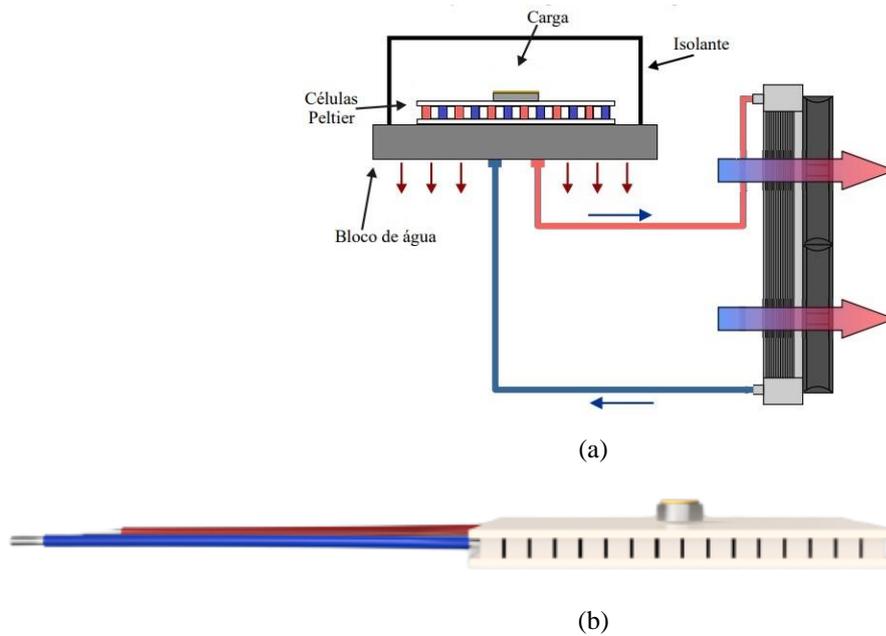
Conforme fase 3 da metodologia proposta, o dispositivo projetado e desenvolvido tem como principal objetivo proporcionar uma ciclagem térmica controlada a Heteroestrutura, que possui volumes relativamente pequenos se comparado a células de peltier utilizadas. Capaz de fornecer conforme desejado, a máquina térmica é constituída por células termoelétricas de efeito Peltier, radiador, bomba e trocador de calor para promover o controle de temperatura. Os citados equipamentos formam o sistema de arrefecimento que possibilita o fluxo do fluido, facilitando a troca de calor da face quente da célula termoelétrica com o ambiente. Dessa forma, é possível gerar o máximo de uniformidade na distribuição de temperatura na amostra, pois a existência de gradientes de temperaturas pode gerar transformações de fases de forma heterogenias, de modo que a troca de calor entre a carga e a célula termoelétrica ocorre por condução. É possível observar na figura 22 o comportamento de um possível gradiente de temperatura na superfície da pastilha termoelétrica com a amostra sob a mesma.

Figura 22 - (a) Representação em CAD do gradiente de temperatura com amostra maior; (b) Representação em CAD do gradiente de temperatura com amostra menor; (c) Representação da amostra na Peltier em escala.



Na figura 23 pode ser observado o esquemático da montagem proposta para a máquina de ciclagem térmica.

Figura 23 - (a) Configuração do equipamento com Célula Termoeétrica e carga térmica; (b) Disposição da amostra na célula termoeétrica; (c) Vista em perspectiva da máquina de Ciclagem térmica em CAD.





(c)

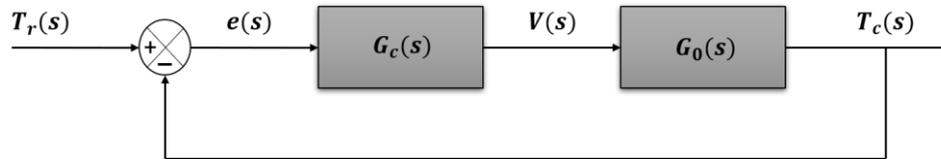
4.1.2 Controle, Instrumentação e Aquisição de Dados

Foi implementado um sistema de controle capaz de atender os requisitos de temperatura necessário para as heteroestruturas. Os pré-requisitos dessa aplicação são: entrada em rampa com taxa de 10 °C/min e erro em regime permanente nulo e a entrada em degrau unitário, com possibilidade de variar a taxa de crescimento em rampa. A construção de um sinal digital em rampa pode ser descrito como pequenos degraus em função da constante de tempo do sistema, considerando a linearidade. Tratando-se de um sistema SISO (Single-Input-Single-Output), foi utilizado como um único atuador as células termoelétricas. Logo, a tensão de saída analógica da placa de aquisição (VM – variável manipulada), será sinal de controle para o módulo termoelétrico, assim também sendo, a temperatura na carga (heteroestrutura), a (VC) variável controlada. Por ser considerada de primeira ordem com atraso de transporte, a função transferência pode ser descrito conforme a equação 16, onde V_0 , K_0 e T_0 são respectivamente, o polo, uma constante e o atraso de transporte.

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s \cdot \tau_0}}{V_0 + 1} \quad (16)$$

O diagrama de blocos de malha fechada, na figura 24, representa o sistema de controle implementado. A temperatura de referência é representada por $T_r(s)$, a temperatura na carga por $T_c(s)$, a variável manipulada por $V(s)$, a função transferência da planta (Módulo termoelétrico) por $G_0(s)$ e a função transferência do controlador é $G_c(s)$.

Figura 24 - Diagrama de Blocos do Sistema de Controle implementado.



A implementação do controlador tornou-se simples, pelo fato de que os sistemas térmicos convencionais são mais lentos, logo necessitando de uma frequência de amostragem mais baixa. O controlador PID foi implementado no software LabView© a qual o diagrama de blocos pode ser visto na figura 25, onde Td é ação derivativa, Ti é a ação integral, ambos em minutos, e o Kc é o ganho proporcional. Para cálculo dos parâmetros do controlador foi utilizado a técnica de Ziegler-Nichols e o método da curva de reação. Nesse método, que é muito utilizado em sistemas de primeira ordem, aplica-se um degrau na entrada e a partir da resposta em malha aberta, é possível obter os valores dos ganhos. A tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros em função dos dados obtidos na curva de resposta. Para $R=A/\tau$, que indica a variação de saída sobre a variação de entrada sobre a constante de tempo L.

Figura 25 - Diagrama de bloco do PID do LabView©

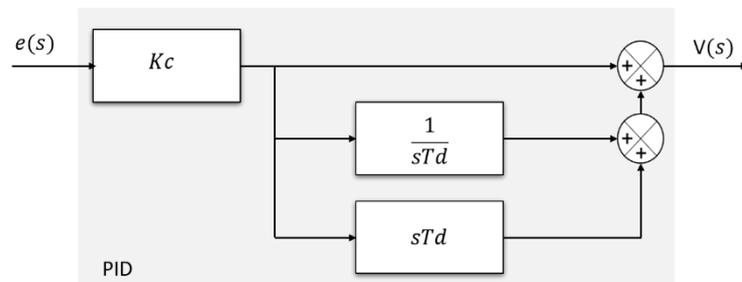


Tabela 3 - Sintonia de Controladores por Ziegler – Nichols

Kc	1,2/RL
Ti	2L
Td	0,5L

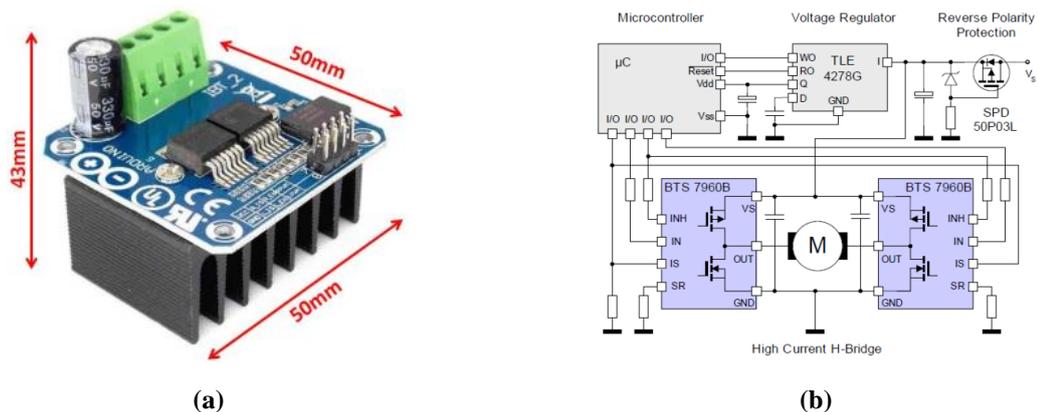
Fonte: Adaptado de (GOODWIN, GRAEBE e SALGADO, 2001)

Após encontrados os parâmetros, alguns pequenos ajustes são realizados para alcançar o desempenho do controlador desejado, pelo fato do método ser empírico e a inserção das amostras na planta a ser controlada.

Para a interface de comunicação eletrônica entre o computador e os módulos termoelétricos foi utilizado uma ESP8266 para gerar o PWM e circuitos em ponte H, chamado de IBT_2, a qual possui um chip BTS7960, compatível com correntes elevadas. A IBT_2 possui um circuito eletrônico composto por quatro transistores acionados por um microcontrolador, conforme representado na figura 26. O microcontrolador recebe dois sinais digitais de controle modulados por largura de pulso (PWM, do inglês Pulse Width Modulation), cada um representando um sentido de alimentação da carga. Conforme manual do fabricante, só deve ser atribuído um sinal positivo ao sistema, enquanto o outro deve ser deixado em nível baixo. Desta forma, o microcontrolador aplica o sinal aos dois lados da ponte e controla o sentido da corrente, a partir de quais transistores estão ativos e quais estão em corte, e a velocidade, através do valor do sinal PWM recebido pelo microcontrolador.

Os módulos termoelétricos são conectados de forma associada com circuitos independentes, acionados simultaneamente. Em alguns testes foram utilizados apenas um módulo termoelétrico. As tensões de alimentação variam entre 0 a 4,5V, sendo provenientes da placa de aquisição com um conversor (digital-to-analog converter - DAC) integrado.

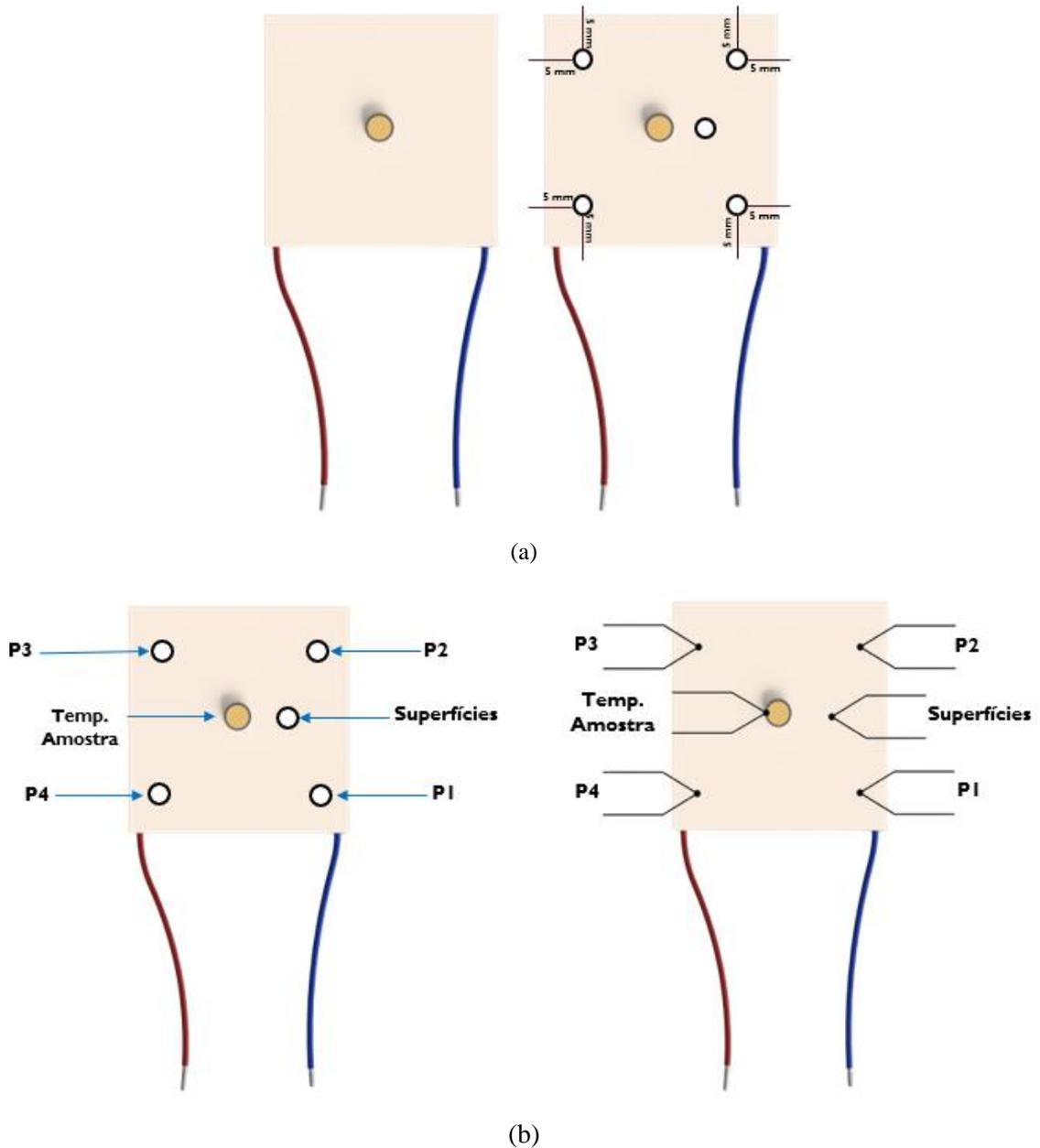
Figura 26 - (a) Placa IBT_2 com chip BTS7960; (b) Diagrama do circuito da placa IBT_2.

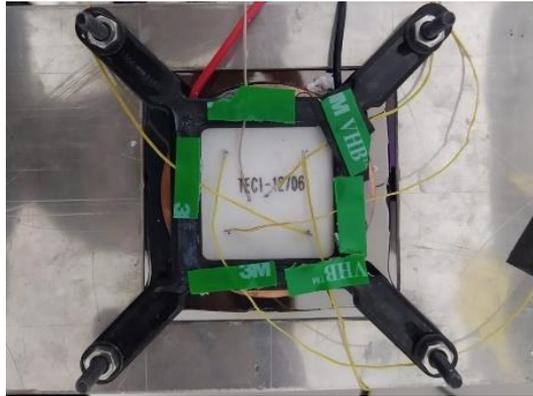


Para medição de temperatura, utilizamos termopares do tipo K, por sua faixa de temperatura condizente com o trabalho, e possui baixa inercia térmica. Foi utilizado 6 pontos de medida de temperatura na busca de verificar o comportamento da temperatura no plano da célula termoelétrica de peltier. Conforme pode ser observado na figura 27(b), a distribuição dos

termopares foi feita de forma que o primeiro monitore a temperatura no centro da amostra, o segundo a superfície ao lado da amostra, o terceiro no canto inferior direito (P1), o quarto no canto superior direito (P2), o quinto no canto superior esquerdo (P3) e o sexto no canto inferior esquerdo (P4).

Figura 27 - (a) Representação em CAD da localização da amostra; (b) Representação em CAD da localização dos termopares.

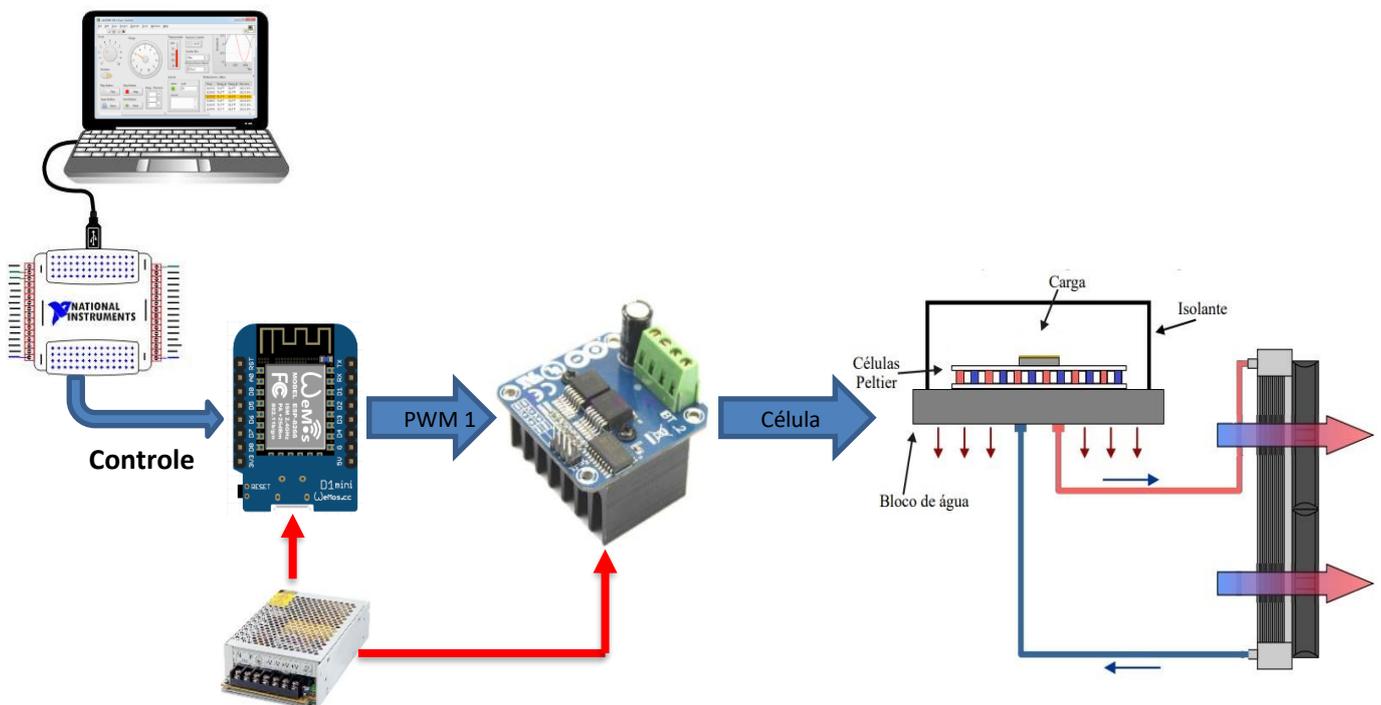




(c)

A aquisição de temperatura foi realizada com uma placa da *National Instruments (NI)*, modelo 9213, com uma interface serial USB para gerenciamento dos dados via computador. Este equipamento é dedicado a uso com termopar, com o condicionamento de sinal internamente, a uma resolução de 24 bits. O *field point* possui 16 canais, modo de alta resolução com 55 ms de tempo de conversão, precisão de até 0,02 °C e erro de medição em torno de 1 °C, para termopares do tipo K.

Figura 28 - Representação do Sistema de Acionamento e Controle.

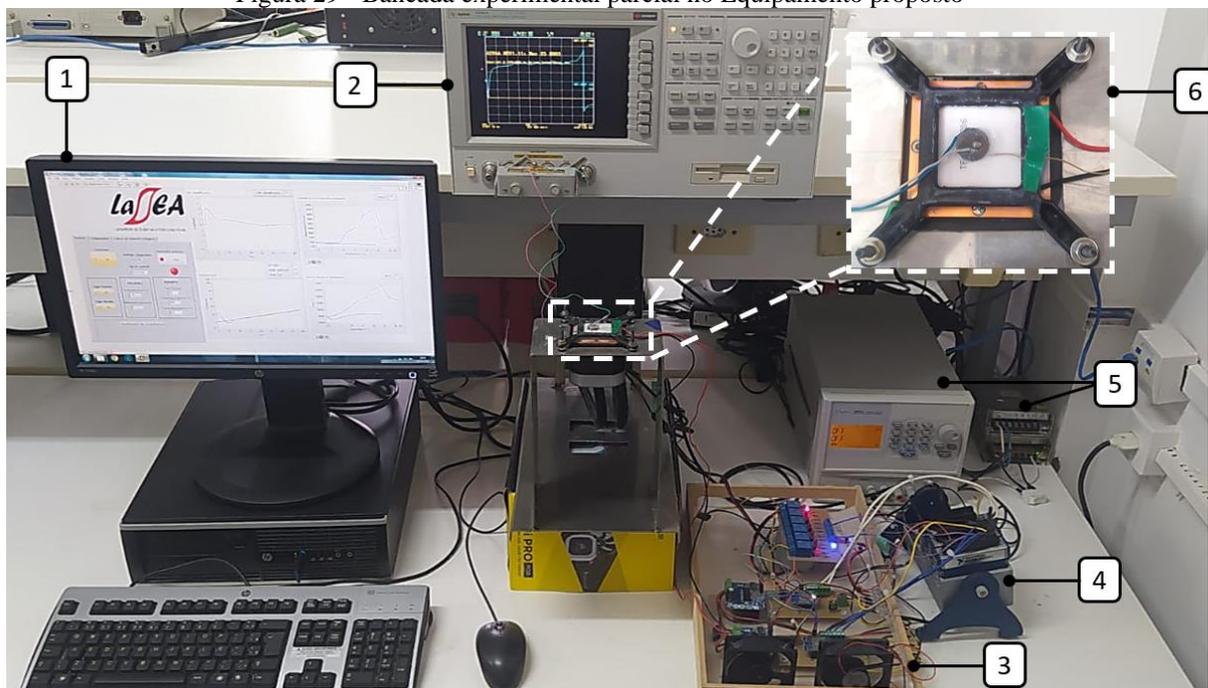


O controlador desenvolvido para temperatura foi implementado no LabView®, discretamente em computador, e as saídas de controle foram convertidas em sinais analógicos para o circuito através de uma placa da *NI*, modelo 9263. Essa placa possui 8 canais de saída

com conversor de 16 bits, tensão de saída entre ± 10 V e frequência de amostragem de 100 kS/s por canal. A interface para comunicação foi dada via serial por uma porta USB, a um tempo de amostragem foi de 300 ms. Este valor é adequado para o sistema de controle pela natureza a resposta do processo térmico analisado, com uma taxa de temperatura empregada de 10 °C/min. A figura 28, apresentam os esquemáticos do sistema de controle de temperatura no equipamento proposto.

A figura 29 apresenta parte da bancada experimental desenvolvida para análise das heteroestruturas, com suas principais partes.

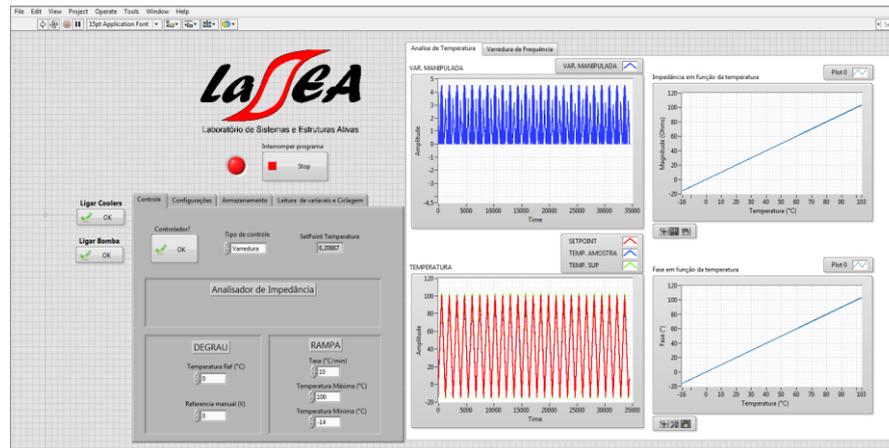
Figura 29 - Bancada experimental parcial no Equipamento proposto



O destaque de número (1) trata-se do computador com software LabView. O (2) é o analisador de impedância utilizado, equipamento da keysigth de modelo 4294A. O (3) corresponde ao sistema de controle de corrente na célula termoelétrica, munido do Drive TPS 7960 e microcontrolador ESP8266 para promover o PWM. O (4) é a placa de aquisição de dados da National Instruments. O (5) são as fontes de alimentação. O (6) trata-se da célula de peltier e porta amostra.

Foi desenvolvida uma interface gráfica no software LabView® para gerenciamento dos sistemas de controle, instrumentação e aquisição de dados, que pode ser vista na figura 30.

Figura 30 - Interface Gráfica em LabView®



4.2 Organização das Amostras

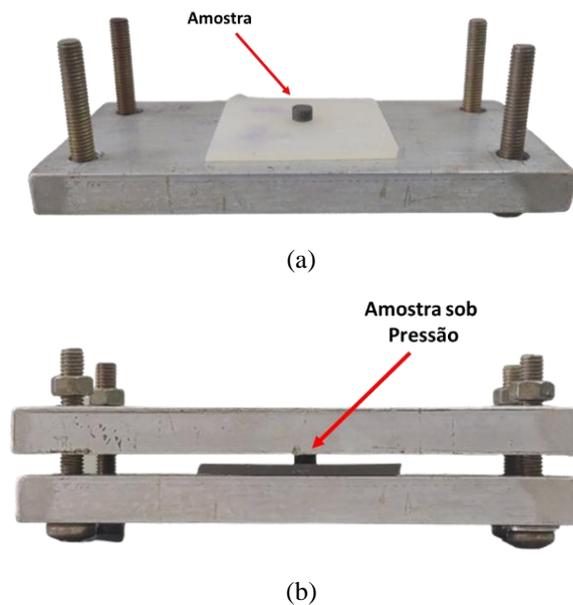
O presente trabalho propõe a concepção da heteroestrutura como corpos de prova para as análises de impedância elétrica nas proporções geométricas de 5 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, conforme descritas nas figuras 31 e 32. As dimensões propostas são dadas na busca de uma menor carga térmica para o equipamento e menor exposição a gradiente de temperatura. As ligas propostas são: 2 de 45Ni-55Ti (Níquel, titânio) com tratamentos térmicos distintos, 48Ni-38Ti-14Nb (Níquel, titânio, Nióbio), 82,5Cu-13,5Al-4Ni (Cobre, Alumínio, Níquel), todas com memória de forma e outras três para realização de ensaios e verificação da resposta térmica da impedância elétrica em um material conhecido, sendo eles Cobre, Aço e Latão. Logo, 4 amostras com PZT-C64, 4 com PZT-PIC255 e 3 de materiais conhecidos, totalizando 11 amostras. Assim, podemos verificar que as características de resposta da impedância na Heteroestrutura em função da temperatura, realmente se deve a liga com memória de forma e não a outros fatores, como o PZT ou a Célula de Peltier. Logo, a comparação dos resultados referentes a materiais convencionais com os apresentam memória de forma, comprovarão a validade do método, de modo que, o comportamento da impedância em função da temperatura evidencia a transformação de fases na SMA. Isto não deve ser observado em outros materiais, mantendo-se os parâmetros do ensaio sob mesmas condições. Para tanto, foram utilizadas duas cerâmicas piezoelétricas distintas: PZT-C64 e PZT-PIC255. Os parâmetros dos sensores utilizados podem ser vistos na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades dos sensores PZT: modelos C64 e PIC255

PZT parameters		C64	PIC255
Electromechanical coupling factor	K_{31}	0.35	0.35
	K_{33}	0.73	0.69
Dielectric constants	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1960	1650
	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1850	1750
Piezoelectric load constant ($\times 10^{-12}$ m/V)	d_{31}	-185	-180
	d_{33}	435	400
	d_{15}	670	550
Young's modulus ($\times 10^{10}$ N/m ²)	$Y_{11}^E = 1/S_{11}^E$	5.9	6.2
	$Y_{33}^E = 1/S_{33}^E$	5.1	4.8
Poisson coefficient	ν	0.34	0.34
Density (g/cm ³)	ρ	7.7	7.8
Mechanical quality factor	Q_m	80	80

As cerâmicas piezoelétricas as quais deseja-se utilizar são dos tipos C64 e PIC255, possuindo geometria de 4,5 mm de diâmetro e 0,4 mm de espessura. O método de fixação da amostra com a cerâmica piezoelétrica é dada por meio de cola (epoxy) KBR-10, normalmente utilizada na colagem de extensômetros. Seguindo o fabricante, após utilizado a cola nas superfícies, as mesmas devem ser submetidas a tratamento térmico em forno por quatro horas a 100°C, sob pressão. Após o processo de cura, o fabricante declara que a cola suportará variações de temperaturas entre -200°C à 300°C. Na figura 31, é apresentado o processo de colagem.

Figura 31 - (a) Amostra sob suporte; (b) Amostra e PZT colados sob pressão; (c) Forno a 100°C; (d) Amostra sob pressão no forno.





(c)



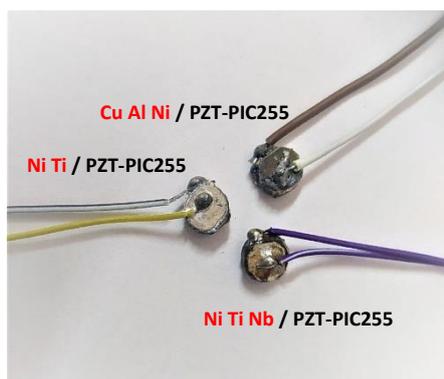
(d)

Na figura 32, é apresentado também a heteroestrutura após processo de colagem, cura, solda de cabos elétricos para medição e furo para inserção do termopar.

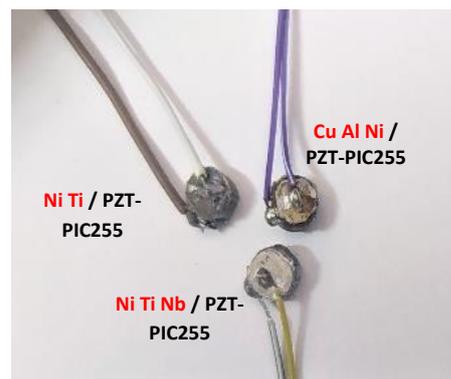
Figura 32 - (a) Modelo CAD da heteroestrutura; (b) Heteroestrutura SMA/PZT-C64; (c) Heteroestrutura SMA/PZT-PIC255



(a)



(b)



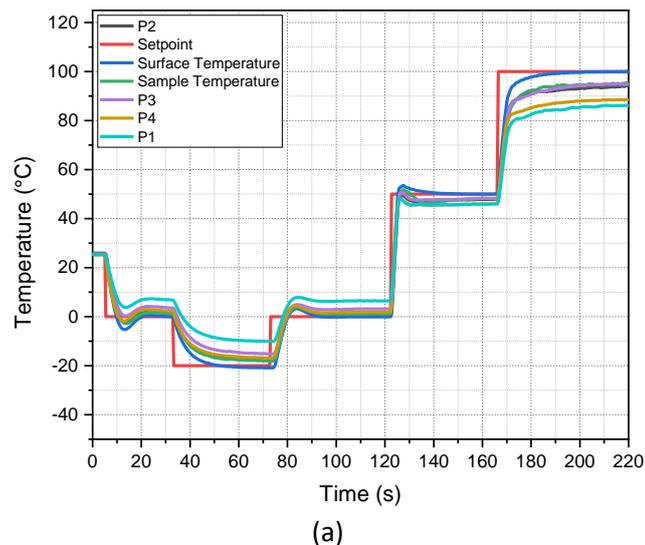
(c)

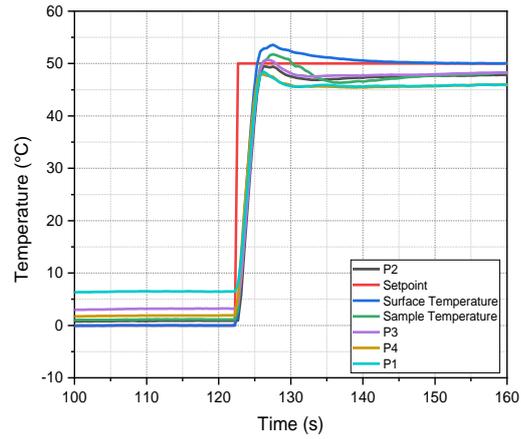
Capítulo 5 - Resultados Preliminares e Discussões

Conforme fase 5 e 6, descrito na metodologia, nesse capítulo iremos abordar os resultados apresentados pelos testes dinâmicos realizados. Inicialmente serão apresentadas as respostas dos testes de caracterização da máquina térmica para as diferentes situações empregadas no objetivo de determinar a faixa de temperatura e tempo de operação. Esse equipamento foi submetido a degraus unitários positivos e negativos, além de ciclagem térmica controlada em rampa.

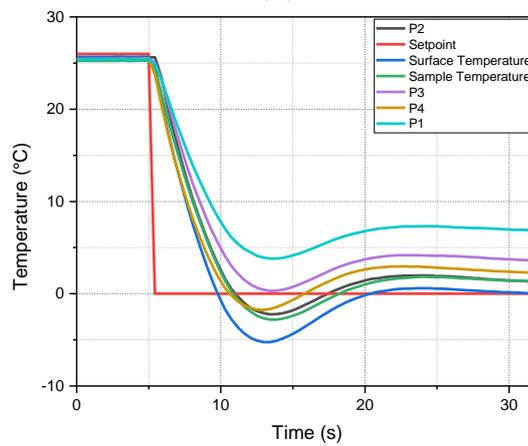
A figura 33 apresenta as respostas de temperatura em função do tempo nos diferentes pontos da superfície do módulo termoeletrônico e na heteroestrutura, em função do tempo. A figura 33(a), trata-se do comportamento da temperatura na superfície e na amostra quando submetido a degraus variados positivos e negativos entre -20 e 100°C . Sendo possível observar a efetividade da ação de controle implementada. Na figura 33(b) e (c) é observado o comportamento da temperatura quando submetido ao degrau unitário positivo e negativo, respectivamente e na figura 33(d) é apresentado o que o equipamento proposto alcança de forma satisfatória a -20°C .

Figura 33 - (a) Degraus de temperatura positivos e negativos aleatórios; (b) Degrau unitário positivo; (c) Degrau de temperatura negativo; (d) Resposta de excitação em degrau unitário na amostra a -20°C .

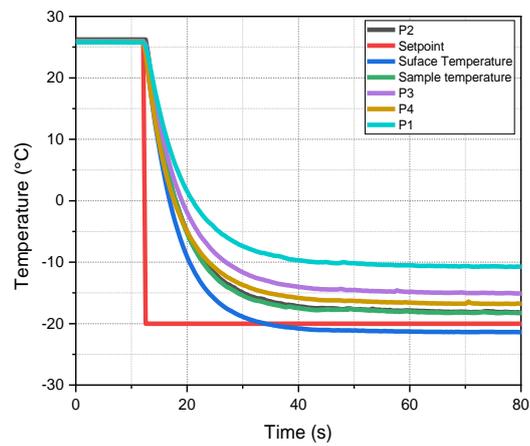




(b)



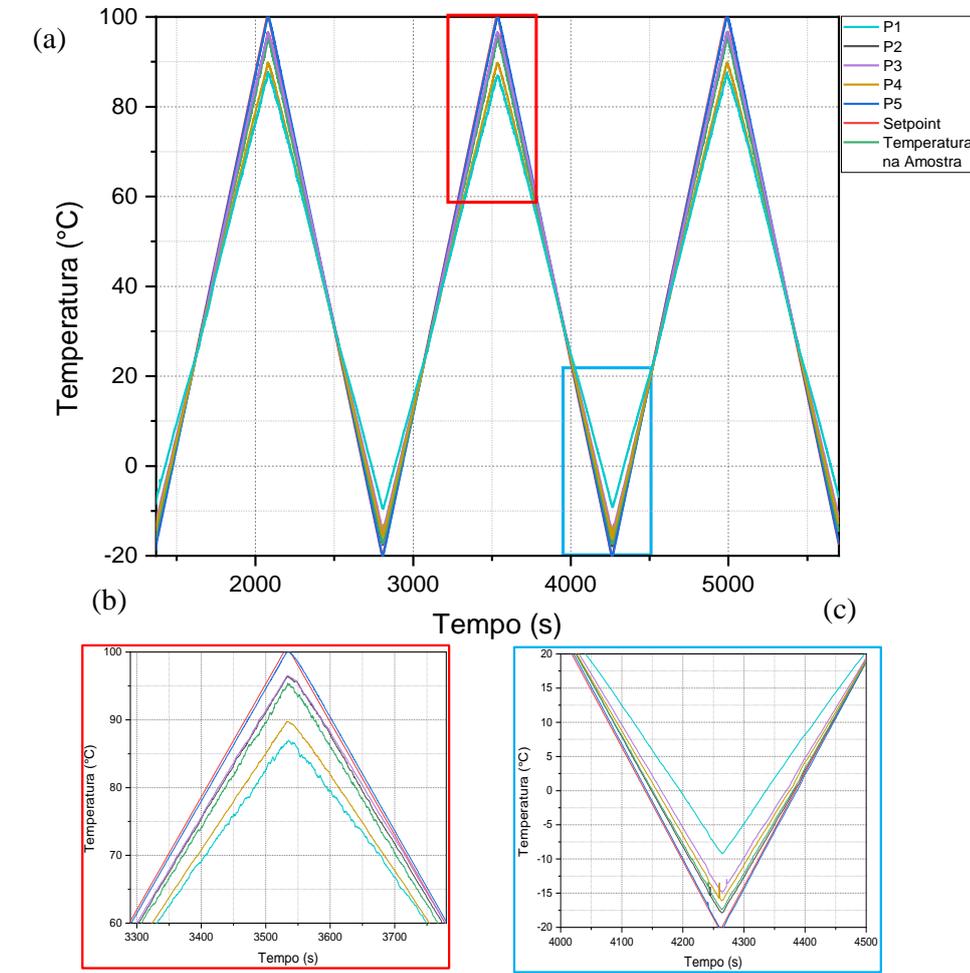
(c)



(d)

A figura 34, apresenta a resposta do equipamento a ciclagem térmica de 3 ciclos a um sinal de referência em forma triangular (rampa), com amostra, apresentando um gradiente de temperatura com uma variação de aproximadamente 15 °C.

Figura 34 - (a) Ciclagem térmica a um sinal de referência em forma triangular; (b) Comportamento gradiente de temperatura positivo; (c) Comportamento do gradiente de temperatura negativo



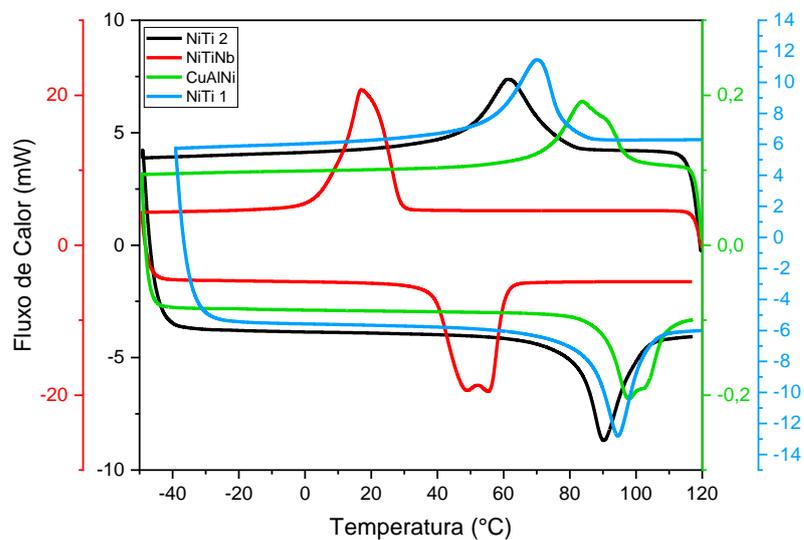
O ensaio foi realizado submetendo-o a uma taxa de aquecimento e resfriamento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, iniciando a temperatura ambiente e variando entre 100°C à -20°C . Ainda pode ser observado na mesma figura, o comportamento do sistema em temperaturas positivas e negativas, pois mesmo havendo um gradiente considerável na superfície do equipamento, a temperatura no ponto onde foi depositada a amostra, permanece estável.

Podemos observar que apesar da existência de gradiente de temperatura na superfície da célula de Peltier, a temperatura na amostra continua estável e com baixíssimas variações. Logo, após identificar os pontos mais estáveis e com menos ruídos, é possível submeter uma amostra a ciclagem térmica de forma confiável.

Nesta seção, os resultados dos testes DSC, temperatura análises de resposta e impedância eletromecânica da heteroestrutura (PZT/SMA). Os resultados foram obtidos para as amostras de SMA propostos. Logo, pode ser analisado comparativamente os resultados de DSC e o método EMIH ao qual pode determinar as temperaturas de transformação de fase. As temperaturas críticas das amostras do teste DSC, a uma taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, para NiTi 1, NiTi 2

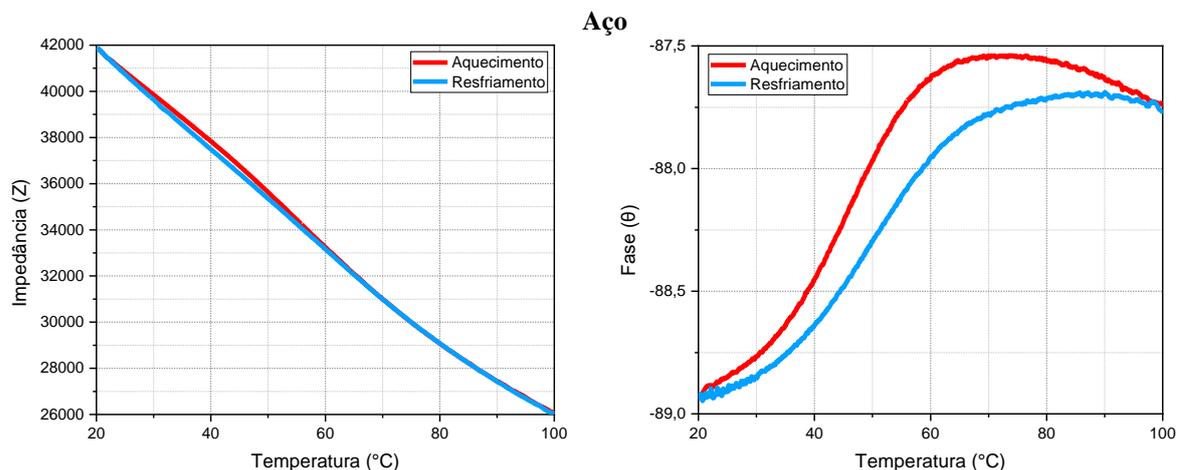
(tratamento térmico distinto), NiTiNb e CuAlNi e uma massa de amostra de 510mg, 501mg, 5012mg e 506 mg, respectivamente, são mostrados na figura 35. O comportamento destas curvas é típico para um SMA quando apenas as fases Austenite e Martensite são presentes nas transformações (sem fase R). Este fato é suportado por valores absolutos bastante próximos do calor absorvido e liberado. As temperaturas de transformação de fase foram identificadas pelo método das tangentes, que consiste em traçar linhas tangenciais aos pontos de inflexão das curvas, coincidindo com os picos transformações.

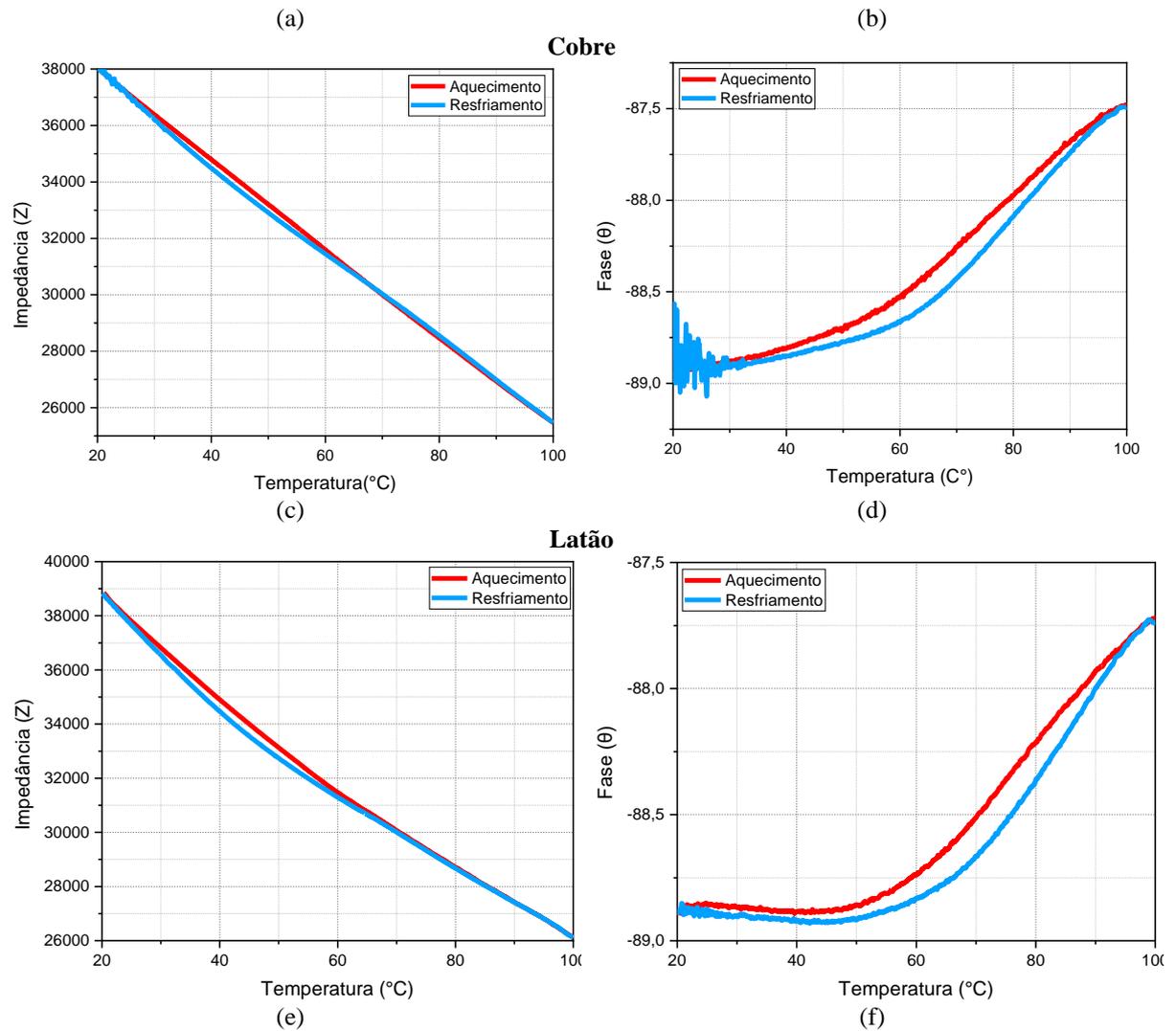
Figura 35 - Resultados de DSC para todas as amostras



Os resultados apresentados na figura 36 diz respeito a impedância em função da temperatura para os materiais Aço, Cobre e Latão, respectivamente. Os parâmetros utilizados na análise foi uma frequência de excitação de 1kHz a uma taxa de 10°C/min.

Figura 36 - (a) Impedância em função da Temperatura do Aço; (b) Ângulo de Fase em Função da Temperatura do Aço; (c) Impedância em função da Temperatura do Cobre; (d) Ângulo de Fase a Função da Temperatura do Cobre; (e) Impedância em função da Temperatura do Latão.





O comportamento da impedância como uma reta crescente e decrescente a partir do aquecimento e resfriamento, respectivamente, indicam que o material analisado não possui transformação de fase, como uma liga de memória de forma, na faixa de temperatura analisada. Logo não são SMA. Na figura 36(a) pode ser visto o comportamento da impedância em função da temperatura para o aço. A figura 36(b), representa o ângulo de fase em função da temperatura para o aço. É representado na figura 36(c) e (d) a impedância e o ângulo de fase para o cobre, respectivamente. A figura 36(e) e (f), apresenta a impedância e ângulo de fase do latão.

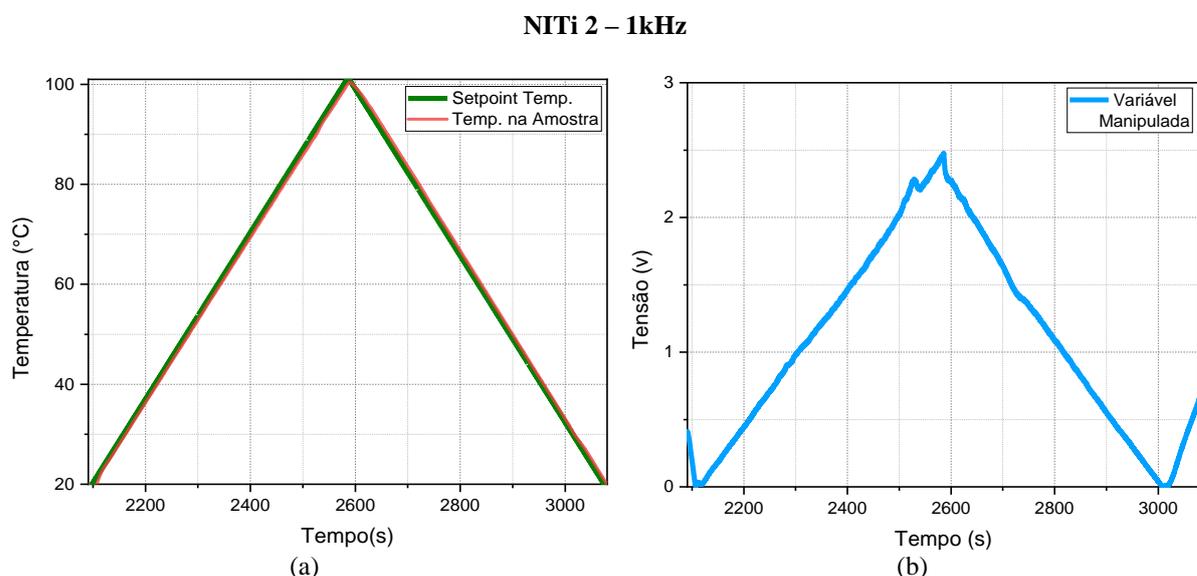
A análise foi realizada com configurações pré-estabelecidas em função das temperaturas de transformações de fases das ligas de SMA propostas. A ciclagem térmica foi implementada nas temperaturas de 20 °C a 100 °C, para as NiTi, 0°C a 100 °C para NiTiNb e 20 °C a 110 °C para CuAlNi. O controlador de temperatura implementado tem como objetivo garantir a curva de aquecimento e resfriamento de maneira linear a uma taxa de tempo de 10°/min, sua sintonia garante uma resposta dinâmica de menos de 2% de erro de regime

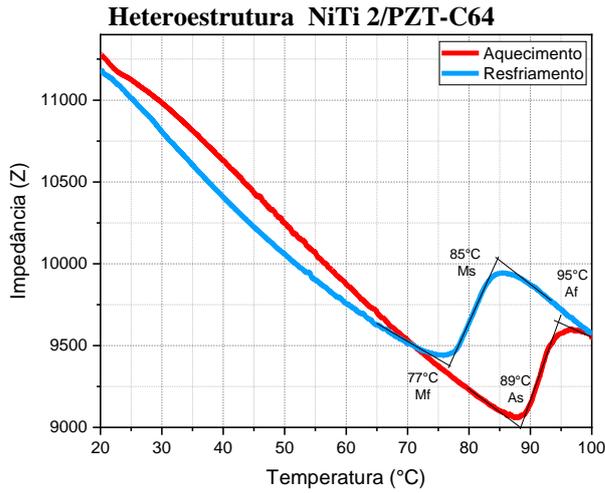
estacionário e menos de 3% de overshoot, como pode ser visto na figura 37 (a e b). Logo, também pode ser observado na mesma figura, o aquecimento e o resfriamento de maneira linear. Esses parâmetros tem como objetivo garantir a total transformação de fases martensíticas para austeníticas na análise.

Nas figuras 37 (c e d), podem ser observadas as respostas de magnitude de impedância em função da temperatura, a uma frequência de excitação de 1 kHz, para os dois tipos de piezoelétricos (PZTs) nas heteroestruturas, NiTi 2/PZT-C64 e o NiTi 2/PZT- PIC255, respectivamente. As características dos PZTs podem ser vistas na tabela 4.

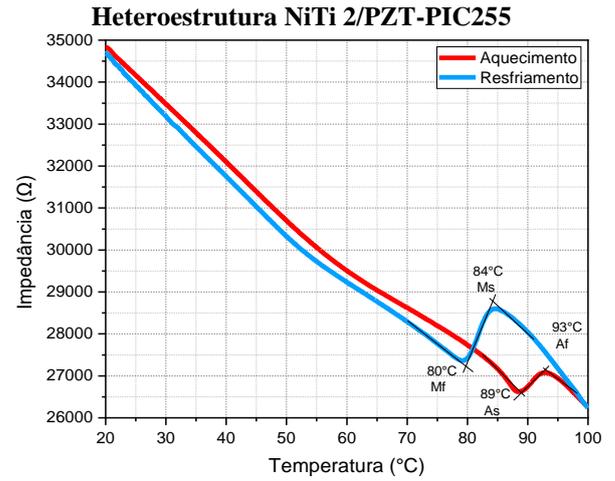
Nas duas heteroestruturas propostas, ao submete-las ao processo de ciclagem térmica, foi observado mudanças de inclinação com dois pontos de inflexão da curva. As inclinações ocorreram muito próximas aos valores de temperaturas críticas obtidos no DSC, sendo melhor ainda comparadas quando visto nas derivadas da impedância na figura 37 (e e f). Pode ser visto também o comportamento do ângulo de fase nas duas heteroestruturas analisadas, na figura 37 (g e h). A curva de ângulo fase também apresenta picos visíveis de transformação igualmente a impedância entre 75 e 95°C. Fica claro que o ângulo fase da impedância também sofre influência nas transformações austeníticas e martensíticas da heteroestrutura (PZT/SMA), isso ocorre devido as partes reais e imaginarias da impedância se relacionam eletricamente.

Figura 37 - (a) Comportamento da temperatura controlada na heteroestrutura; (b) variável manipulada para controle da temperatura; (c) Magnitude de impedância em função da temperatura no NiTi/PZT-C64; (d) magnitude de impedância em função da temperatura no NiTi 2/PZT-PIC255; (e) Derivada da impedância em função da temperatura NiTi 2/PZT-C64; (f) Derivada da impedância em função da temperatura NiTi 2 /PZT-PIC255 ;(g) Curva de ângulo de fase em NiTi 2/PZT-C64; (h) Curva de ângulo de fase em NiTi 2/PZT-PIC255

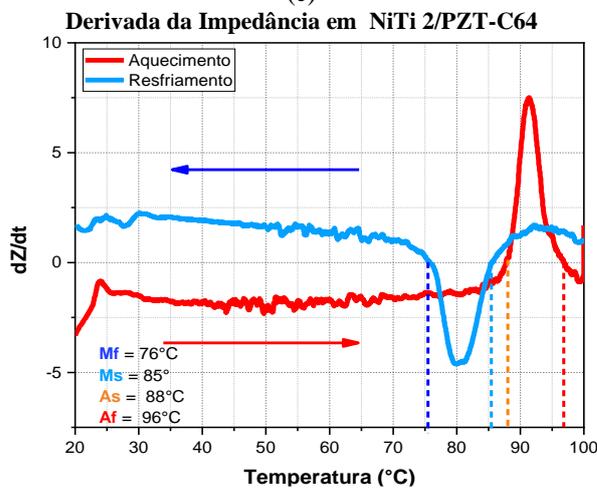




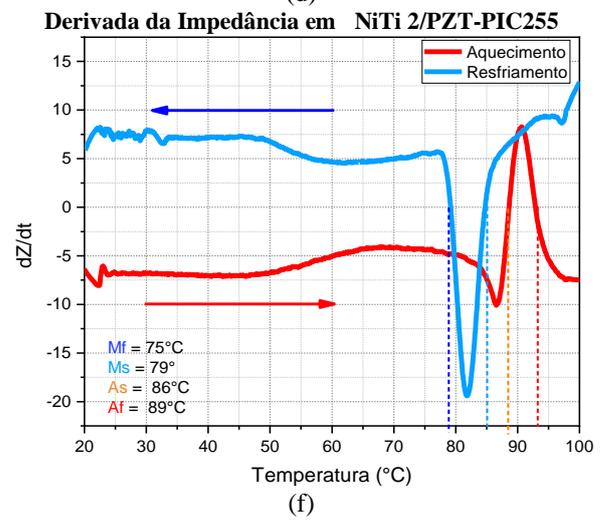
(c)



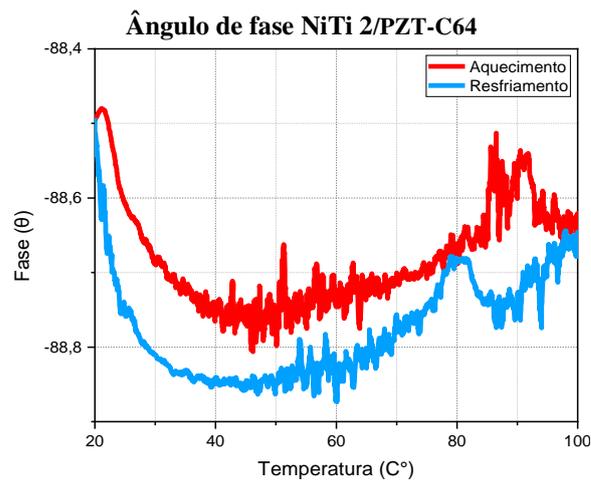
(d)



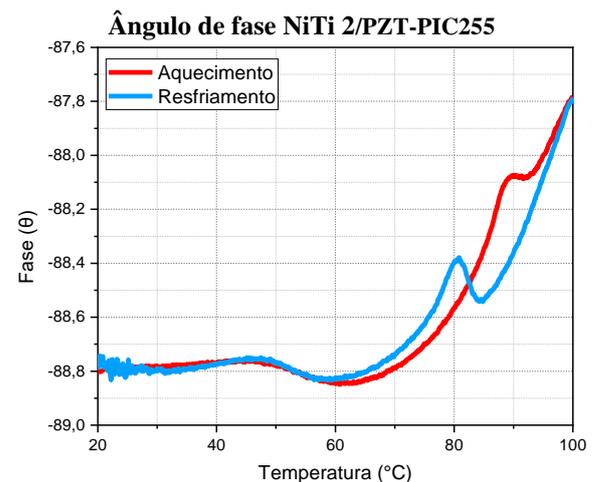
(e)



(f)



(g)



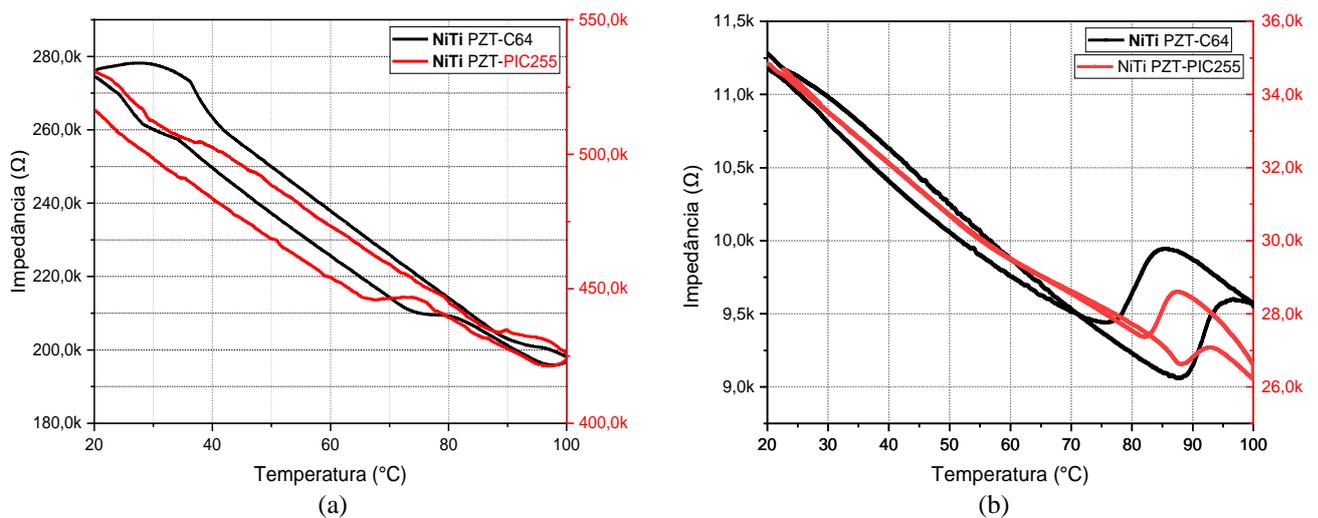
(h)

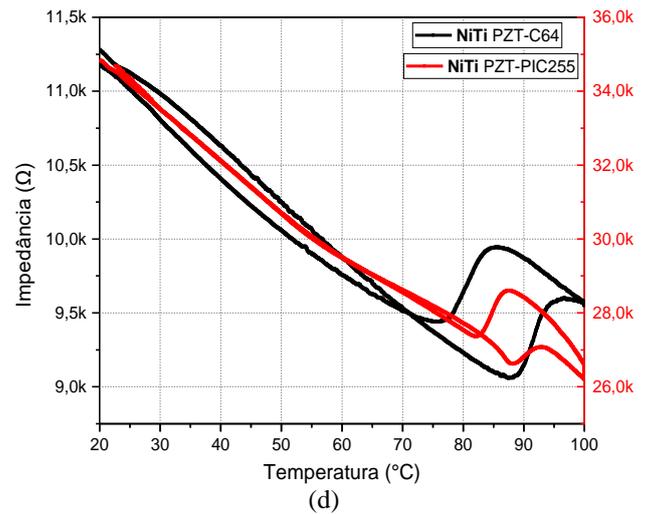
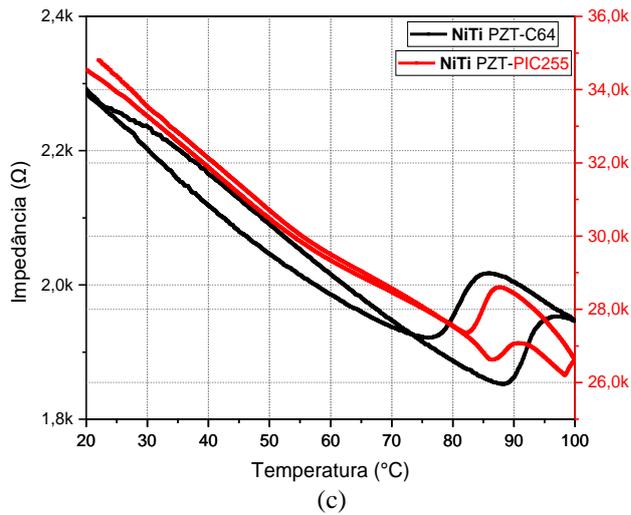
O método de detecção de transformação de fase por EMIH (eletromechanical impedance in heterostructures), mede por meio da variação da rigidez da estrutura, enquanto o RET (Resistência Elétrica em Função da Temperatura), rastreia a variação de resistividade

elétrica do material no aquecimento e resfriamento. Já no DSC são observados a quantidade de calor que a amostra absorve. Ainda é observado que com o comportamento capacitivo do transdutor piezoelétrico o ângulo de fase (teta) se aproxima de 90° , onde a parte imaginária é negativa. É importante ressaltar que o comportamento da curva de magnitude de impedância em heteroestruturas PZT/Cobre, PZT/Aço, e PZT/Brass, são retas lineares, comprovando que a histerese e o comportamento do loop por amostras de PZT/SMA são devidas à transformação de fase em SMA (CUNHA et al., 2019).

A figura 38 apresenta o comportamento da magnitude de impedância em variadas frequências de excitação, para os dois tipos de heteroestrutura, SMA/PZT-C64 e SMA/PZT-PIC255, utilizados na liga de NiTi 2. Mais especificamente em 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz a uma taxa de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Todos os ciclos apresentam mudanças de inclinação com dois pontos de inflexão, onde estão dispostos na faixa de temperatura entre os valores obtidos no DSC. É constatado que em baixas frequências do PZT fornece valores de impedância mais altos, devido natureza capacitiva do mesmo, figura 38(a). Na frequência de 100Hz os picos são mais discretos, porém a partir de 1kHz os picos tornam-se mais visíveis. Pode ser observado também que apesar de PZTs diferentes, os resultados divergem pouco, porém sendo totalmente viável a utilização dos dois tipos propostos.

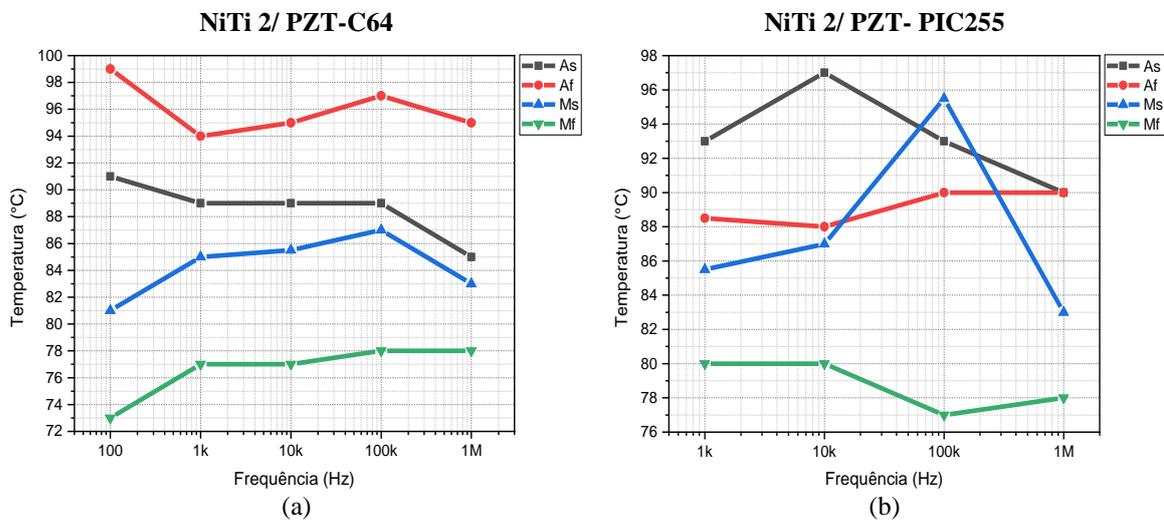
Figura 38 - (a) Curva de magnitude de impedância da NiTi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância da NiTi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância da NiTi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz.





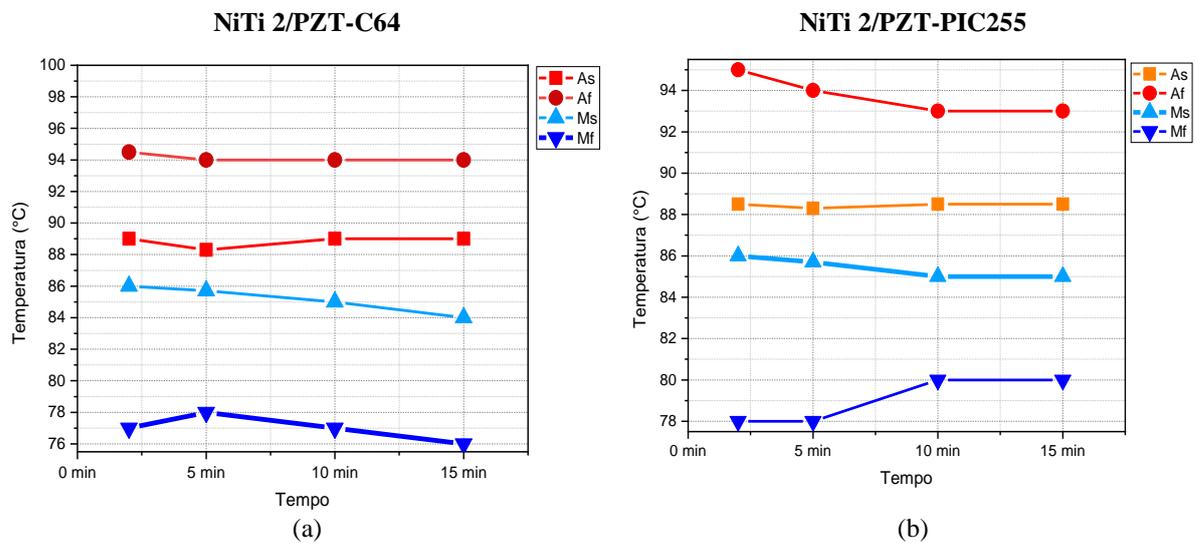
Para investigação da técnica, foi analisado o comportamento das temperaturas críticas das ligas estudadas nas variadas frequências anteriormente discutidas (100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz 1MHz). Para a heteroestrutura NiTi 2/PZT-C64 e NiTi 2/PZT-PIC255, a uma taxa de 10°C/min, pode ser observado a figura 39. O comportamento de As, Af, Ms e Mf apresenta pequenas variações entre uma temperatura crítica e outra, figura 39 (a), em função da frequência de excitação analisada. Na figura 39(b) as temperaturas críticas apresentam-se de maneira linear em função da frequência de excitação, mais especificamente entre 1kHz e 100kHz. Os resultados da NiTi 2/PZT-PIC255, para a frequência de 100Hz mostrou-se inconclusivo e os resultado de 1MHz apresentou pequena decréscimo de temperatura perante as outras frequências.

Figura 39 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTi/PZT-C64 e (b) Temperatura em função da frequência para NiTi/PZT- PIC255



Para as mesmas heteroestrutura NiTi/PZT-C64 e NiTi/PZT-PIC255, foi analisado a as temperaturas críticas em função da taxa de aquecimento e resfriamento. Foi realizado ensaios com 2, 5, 10 e 15°C/min com o intuito de monitorar o comportamento das transformações em função do tempo. A figura 40 (a) demonstra um comportamento linear com uma pequena variação de temperatura em função da taxa de variação do tempo. É notório que a 10 e 15°C/min as temperaturas comporta-se de ainda mais maneira estável.

Figura 40 - (a) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-C64. (b) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-PIC255.



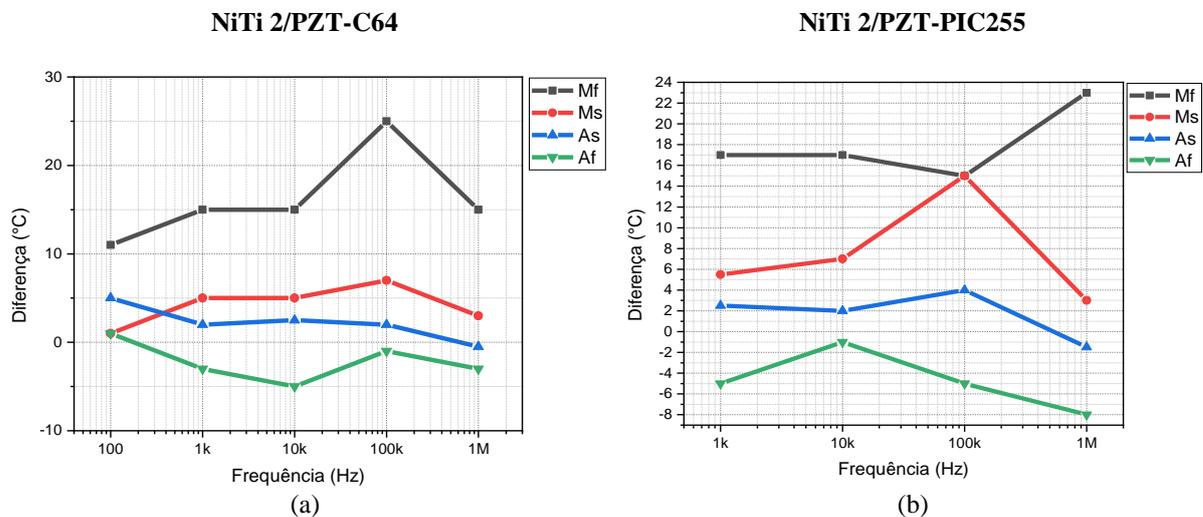
Foi realizado um comparativo junto as temperaturas críticas das ligas estudadas. Comparamos os resultados obtidos pelo DSC, para NiTi 2, e aos resultados obtidos pela técnica EMIH. Na tabela 5, visualizamos Mf, Ms, As e Af para as frequências e taxas de variação de tempo propostas para análise. Também pode ser observado a diferença entre a técnica de EMIH e o DSC. Onde pode-se observar menores diferenças para as frequências de 1 e 10 kHz para os dois PZTs propostos e uma leve variação para as taxas de aquecimento e resfriamento.

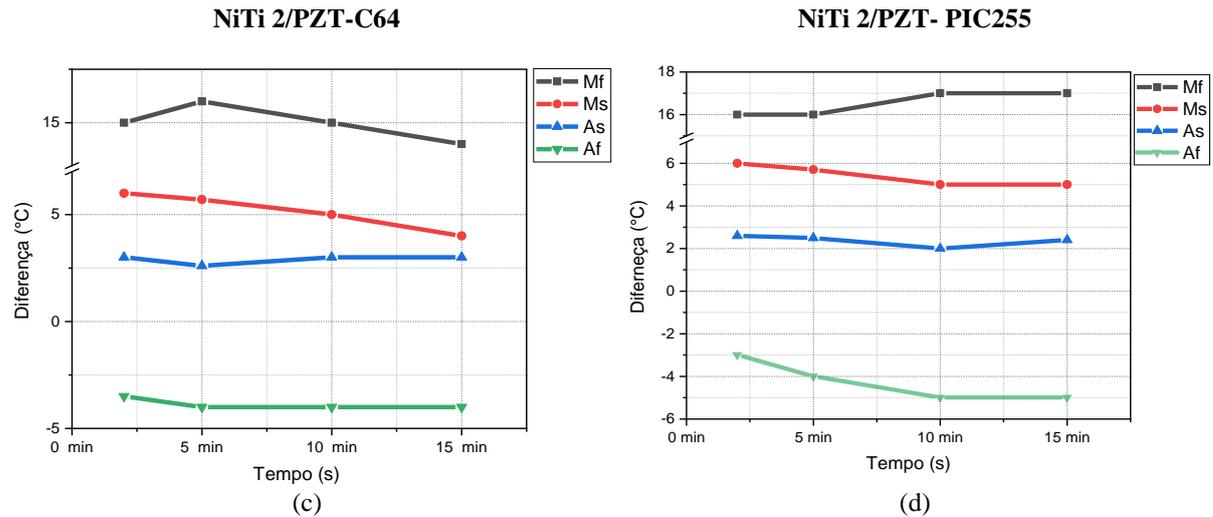
Tabela 5 - Análise das temperaturas críticas da NiTi/PZT-C64 e PIC255

Transformation		Mf	Dif. (DSC)	Ms	Dif. (DSC)	As	Dif. (DSC)	Af	Dif. (DSC)	
DSC		62°C		80°C		86°C		98°C		
Frequency - 10°C/min	100Hz	C64	73	11	81,0	1	91,0	5	99,0	1
		PIC255	--	--	--	--	--	--	--	--
	1kHz	C64	77	15	85,0	5	88,0	2	95,0	-3
		PIC255	80	17	85,5	5,5	88,5	2,5	93,0	-5
	10kHz	C64	77	15	85,0	5	88,5	2,5	93,0	-5
		PIC255	80	17	87,0	7	88,0	2	97,0	-1
	100kHz	C64	88	25	87,0	7	88,0	2	97,0	-1
		PIC255	77	15	95,5	15	90,0	4	93,0	-5
	1MHz	C64	77	15	83,0	3	85,5	-0,5	95,0	-3
		PIC255	78	23	83,0	3	84,5	-1,5	90,0	-8
Transformation		Mf	Dif. (DSC)	Ms	Dif. (DSC)	As	Dif. (DSC)	Af	Dif. (DSC)	
DSC		62°C		80°C		86°C		98°C		
Time Rate - 1kHz	2°C/min	C64	77,0	15	86,0	6	89,0	3	94,5	-3,5
		PIC255	78,0	16	86,0	6	88,6	2,6	95,0	-3
	5°C/min	C64	78,0	16	85,7	5,7	88,0	3	94,0	-4
		PIC255	78,0	16	85,7	5,7	88,5	2,5	94,0	-4
	10°C/min	C64	77,0	15	85,0	5	89,0	3	94,0	-4
		PIC255	80,0	17	85,0	5	88,0	2	93,0	-5
	15°C/min	C64	76,0	14	84,0	4	89,0	3	94,0	-4
		PIC255	80,0	17	85,0	5	88,4	2,4	93,0	-5

Ao investigar a diferença das temperaturas críticas em relação ao DSC, em função da frequência, figura 41 (a e b) e do tempo (c e d), é notório que a variação referente a Mf é maior, haja vista que no final da transformação de fase martensita o material emite baixa energia, ocasionando maior dificuldade para o medidor de fluxo de calor, no DSC, tornando a curva com uma inflexão mais suave do que no início da transformação (austenita-martensita). Já no método apresentado esse problema de baixa energia emitida pelo material não afeta a medição, conforme observado na derivada da impedância. Portanto, justifica a maior diferença na fase martensítica.

Figura 41 - Análise das temperaturas críticas da NiTi/PZT-C64 e PIC255

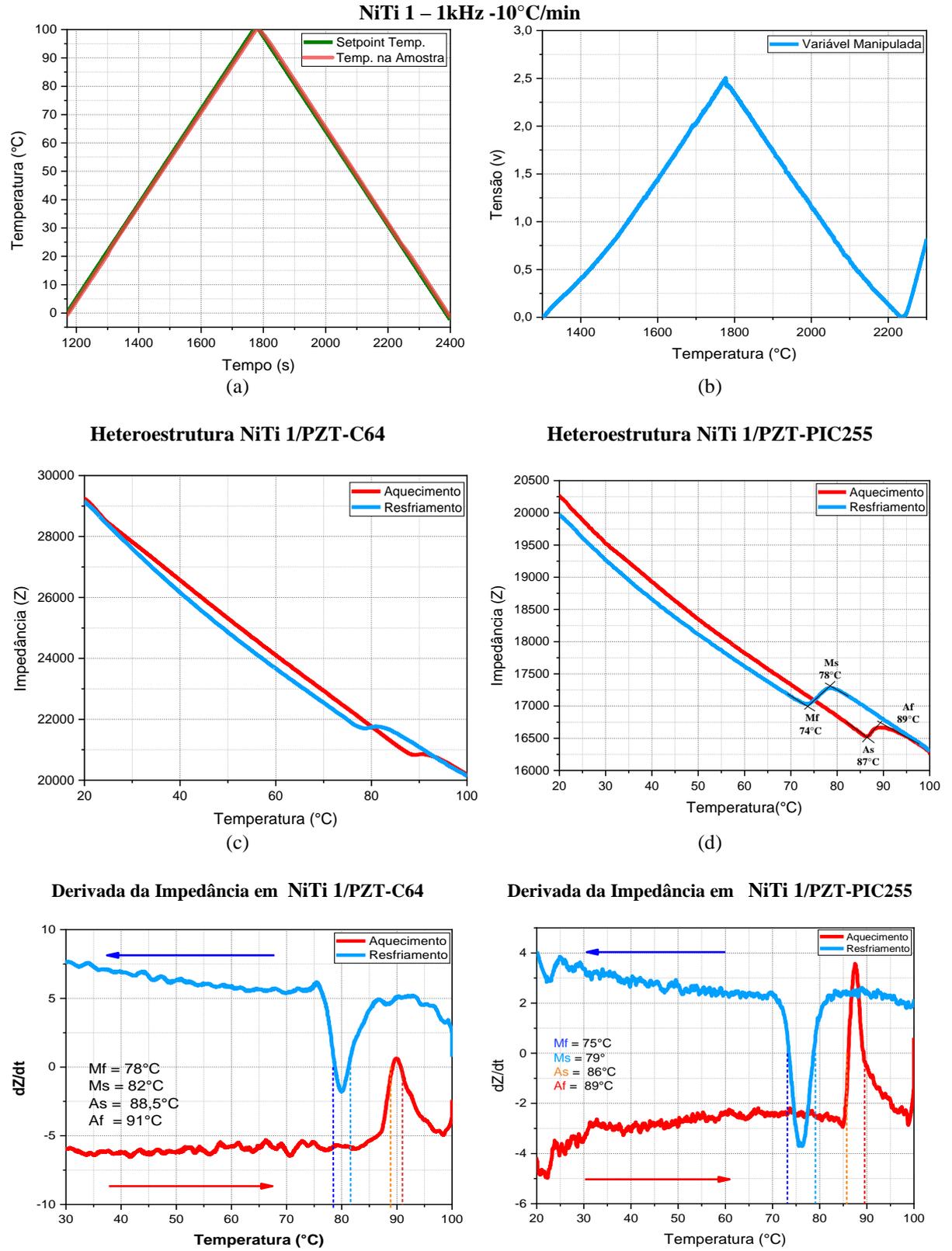


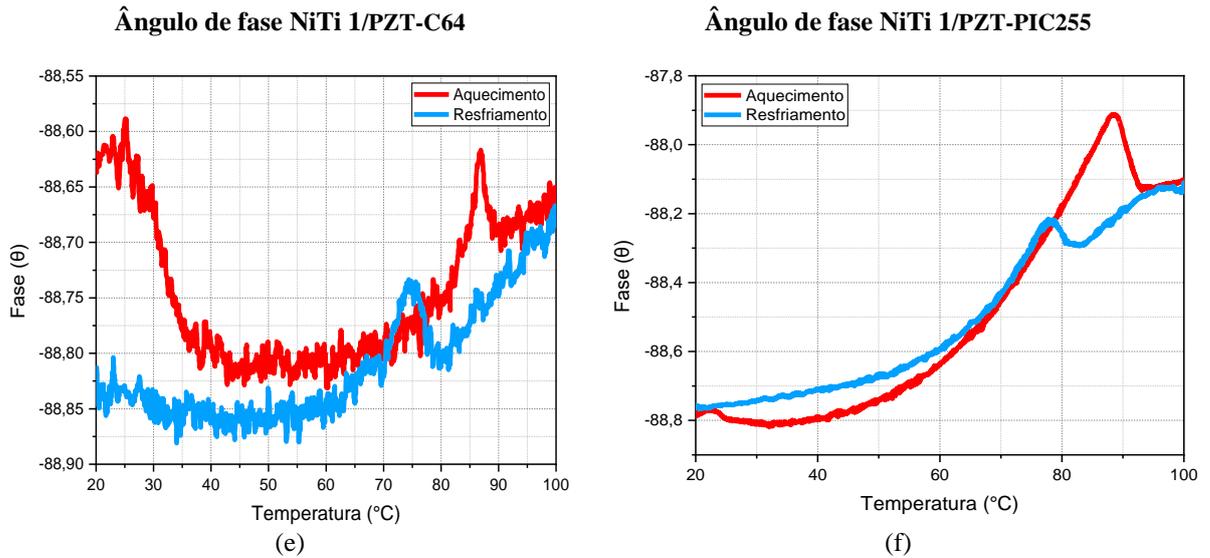


Os resultados apresentados na figura 42, diz respeito a liga de NiTi 1. As heteroestruturas montadas e analisadas de NiTi 1/PZT-C64 e o NiTi 1/PZT- PIC255, submetidas a uma frequência de excitação de 1kHz a uma taxa de 10°C/min.

Nas duas heteroestruturas propostas, ao submete-las ao processo de ciclagem térmica, também foi observado mudanças de inclinação com dois pontos de inflexão da curva. Como também visto na liga NiTi 2, figura 37. As inclinações ocorreram muito próximas aos valores de temperaturas obtidos no DSC, apresentado na figura 42, porém com inclinações de amplitudes menores que na liga de NiTi 2. Em 42 (e e f) podem ser vistas a derivada das impedâncias em função da temperatura. Pode ser visto também o comportamento do ângulo de fase nas duas heteroestruturas analisadas, na figura 42 (g e h). Este, por sua vez, bem mais perceptível sua inclinação, formando picos muito claros de transformação de fase igualmente a impedância entre 75 e 90°C. Mais uma vez fica claro que o ângulo fase da impedância também sofre influência nas transformações austeníticas e martensíticas da heteroestrutura (PZT/SMA).

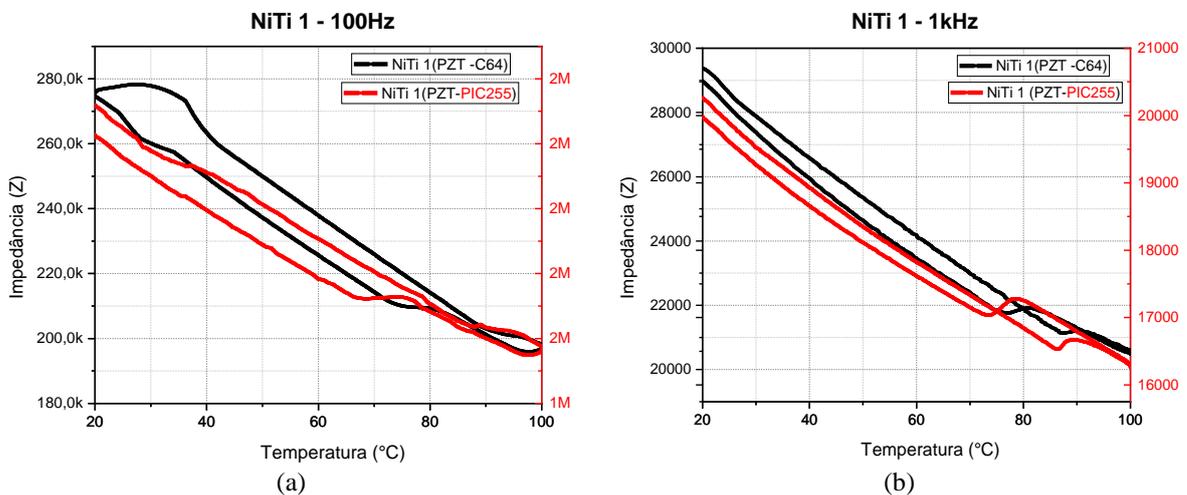
Figura 42 - (a) e (b) Temperatura controlada na heteroestrutura, (c) Magnitude de impedância em NiTi 1/PZT-C64, (d) magnitude de impedância em NiTi 1/PZT-PIC255; (g) Curva de ângulo de fase em NiTi 1/PZT-C64 e (h) Curva de ângulo de fase em NiTi 1/PZT-PIC255.

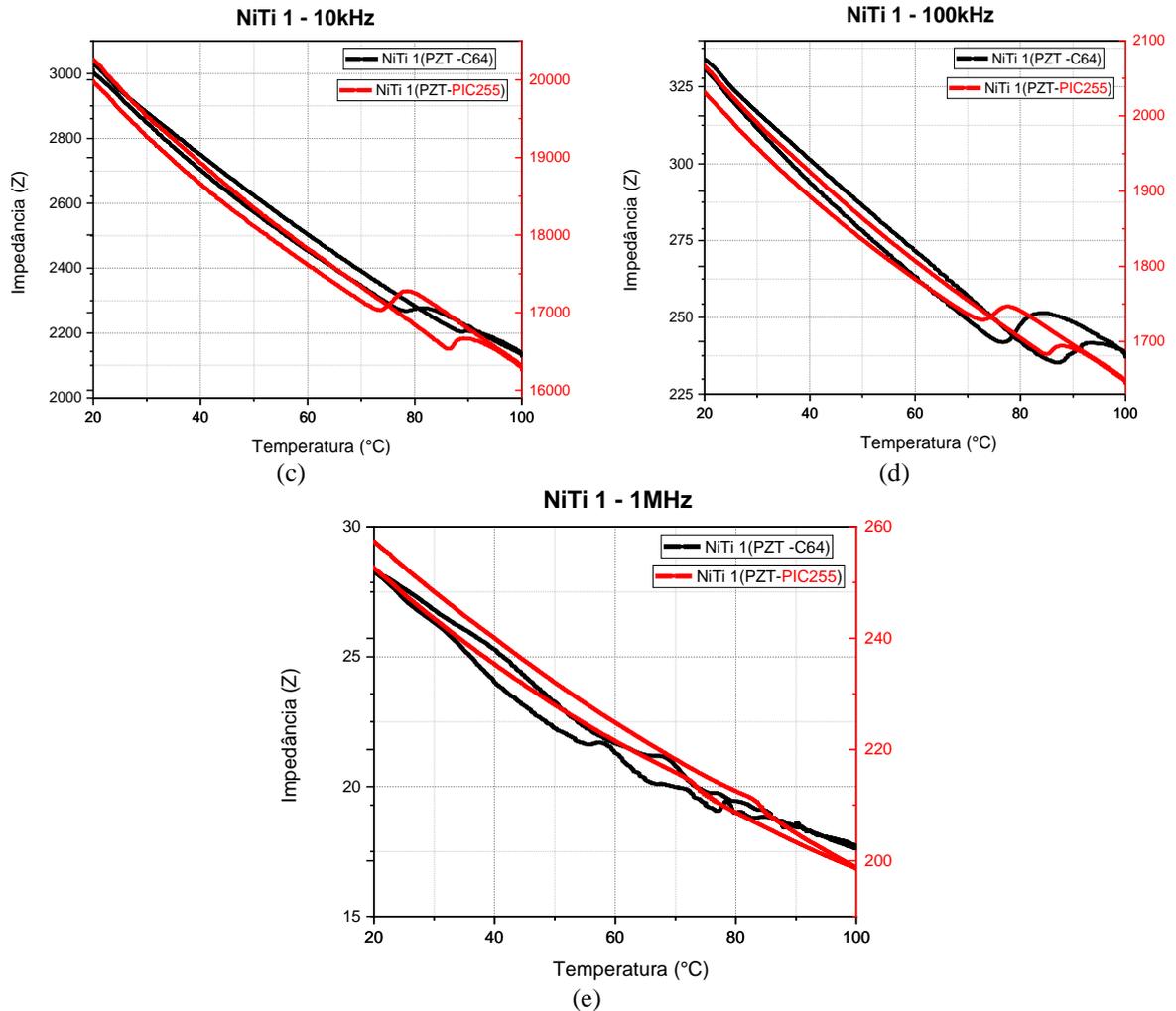




A figura 43 apresenta o comportamento da magnitude de impedância em variadas frequências de excitação, para os dois tipos de heteroestrutura, SMA/PZT-C64 e SMA/PZT-PIC255, utilizados na liga de NiTi 1. Mais especificamente em 100Hz, 1kHz, 10kHz e 100kHz a uma taxa de 10°C/min. Como observado na liga anterior, todos os ciclos apresentam curvas com dois pontos de inflexão, onde estão dispostos na faixa de temperatura entre os valores obtidos no DSC. É constatado que em baixas frequências do PZT fornece valores de impedância mais altos, devido natureza capacitiva do mesmo, figura 43(a). Na frequência de 100Hz os picos são mais discretos, porém a partir de 1kHz os picos tornam-se mais visíveis. Na frequência de 1MHz, torna-se quase inviável detectar todas as temperaturas críticas.

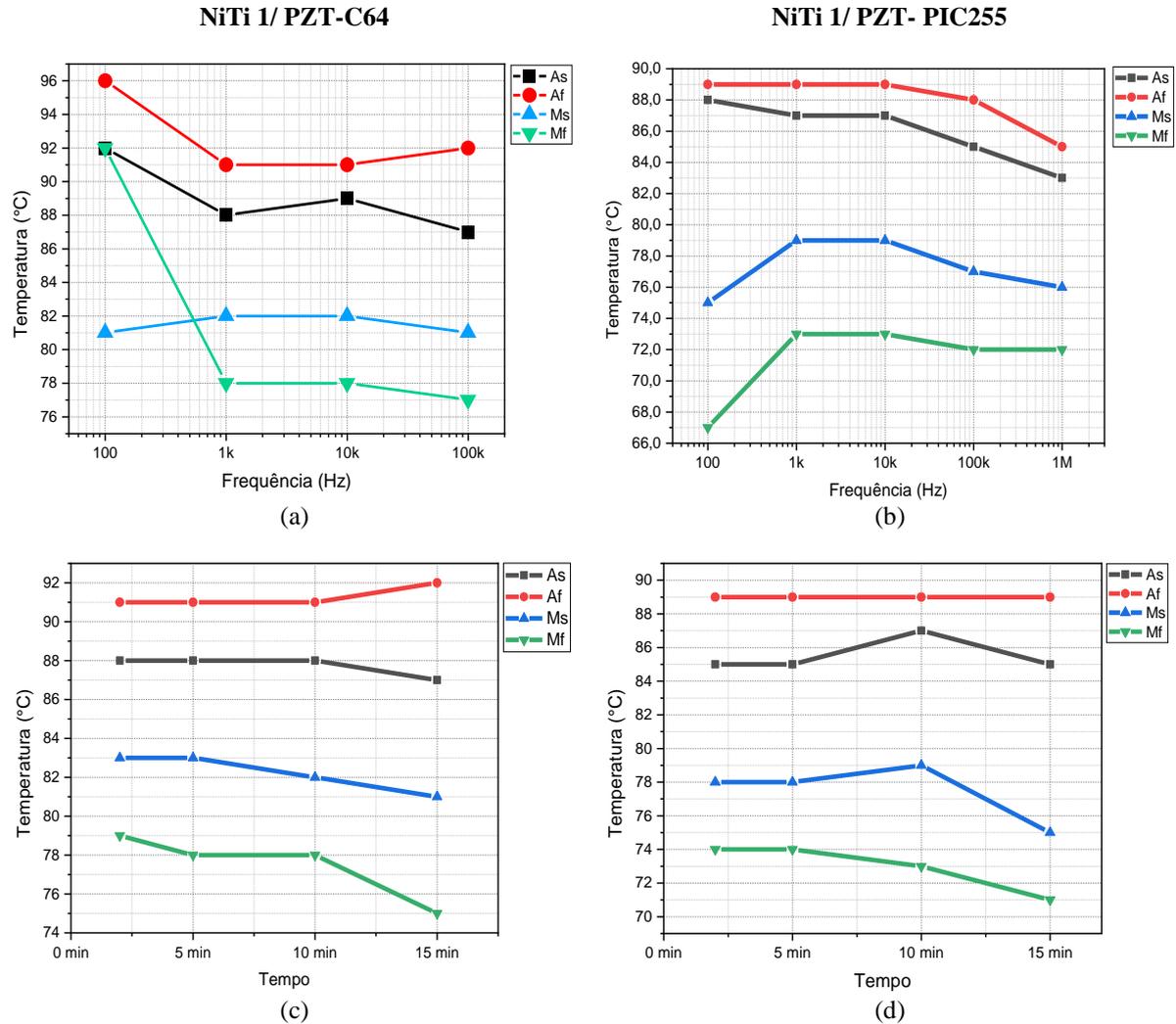
Figura 43 - (a) Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 10kHz; (d) Curva de magnitude de impedância em NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz e Curva de magnitude de impedância NiTi 1 (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1MHz





Ao vermos as temperaturas críticas isoladamente nos estudos da NiTi 1/PZT-C64 e NiTi 1/PZT-PIC255, a uma taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, pode ser observado na figura 44. Para as frequências de 100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz 1MHz, o comportamento de As, Af, Ms e Mf apresentam com pequenas variações entre 2 e 5°C . Para a heteroestrutura contendo o PZT-C64, não foi possível detectar as transformações nas frequências de 100Hz e 1Mhz. Na do PIC255 não foi possível detectar as transformações austeníticas de maneira precisa. Elas também apresentam poucas variações com tendências de estabilidade em função da frequência. Para as figuras 44(c) e (d), apresenta um crescimento sutil de instabilidade nos ciclos de 15min.

Figura 44 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTi 1/PZT-C64; (b) Temperatura em função da frequência para NiTi/PZT- PIC255; (c) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-C64; (d) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTi 2/PZT-PIC255



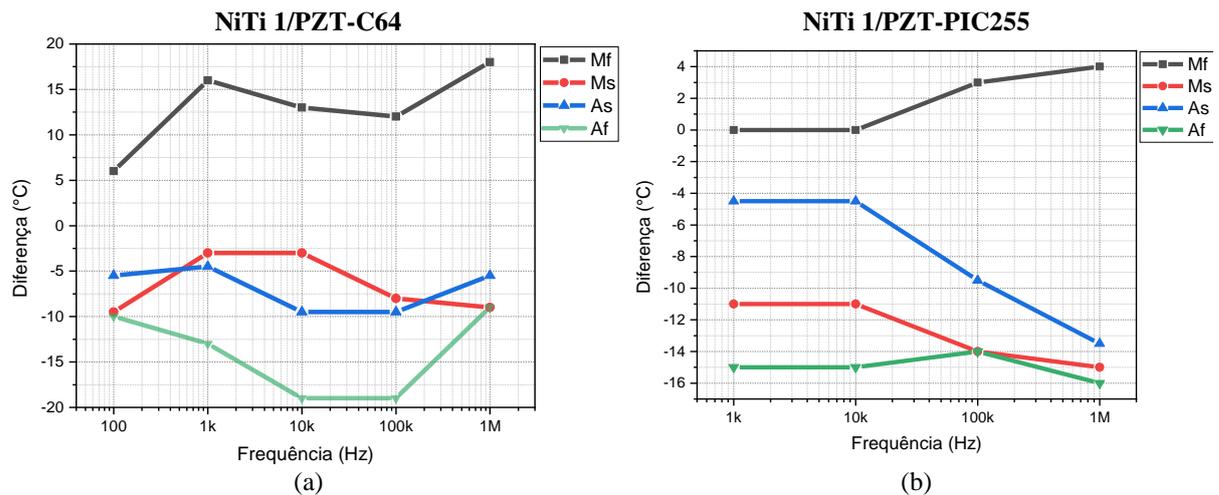
Para essa liga (NiTi 1), também foi realizado um comparativo junto as temperaturas críticas. Comparamos os resultados obtidos pelo DSC (figura 37), para NiTi 1, e aos resultados obtidos pela técnica EMIH. Na tabela 6, visualizamos Mf, Ms, As e Af para as frequências e taxas de variação de tempo propostas para análise. Ainda foi calculado a diferença entre a técnica de EMIH e o DSC.

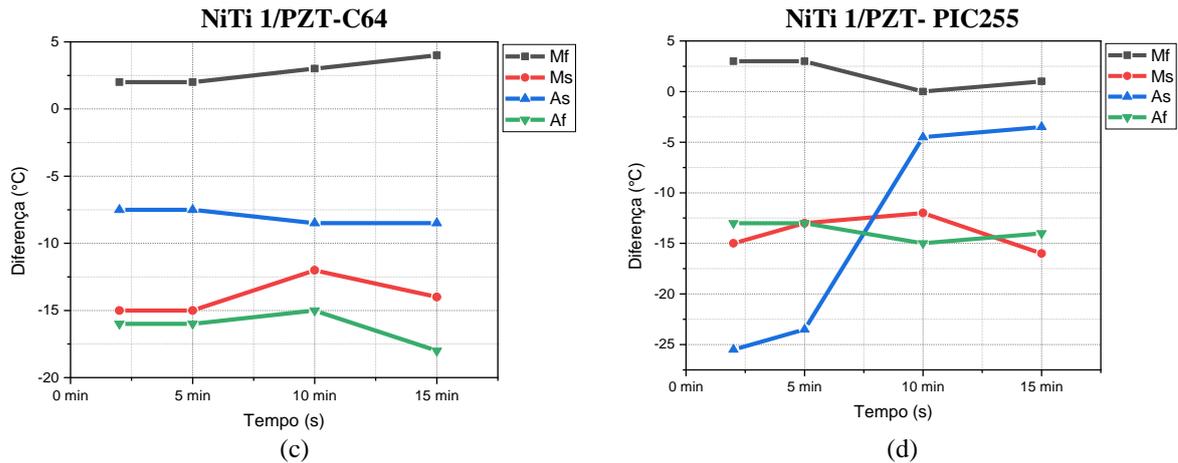
Tabela 6 - Análise das temperaturas críticas da NiTi 1/PZT-C64 e PIC255

	Transformation	Mf	Dif. (DSC)	Ms	Dif. (DSC)	As	Dif. (DSC)	Af	Dif. (DSC)	
	DSC	58°C		80°C		82°C		101°C		
Frequency - 10°C/min	100Hz	C64	92,0	30	81,0	1	92,0	10	96,0	-5
		PIC255	67,0	9	75,0	-5	88,0	6	89,0	-12
	1kHz	C64	78,0	20	82,0	2	88,0	6	91,0	-10
		PIC255	74,0	16	72,0	-8	86,0	4	89,0	-11
	10kHz	C64	78,0	20	82,0	2	89,0	7	91,0	-10
		PIC255	73,0	15	79,0	-1	87,0	5	89,0	-11
	100kHz	C64	77,0	19	81,0	1	87,0	5	92,0	-9
		PIC255	72,0	14	78,0	-2	85,0	3	88,0	-12
	1MHz	C64	--	--	--	--	--	--	--	--
		PIC255	72,0	14	76,0	-4	83,0	1	85,0	-16
Time Rate - 1kHz	2°C/min	C64	79,0	21	83,0	3	88,0	6	91,0	-10
		PIC255	74,0	16	78,0	-2	85,0	3	89,0	-12
	5°C/min	C64	78,0	20	83,0	3	88,0	6	88,0	-13
		PIC255	74,0	16	78,0	-2	85,0	3	89,0	-12
	10°C/min	C64	78,0	20	82,0	4	88,0	6	91,0	-11
		PIC255	74,0	16	78,0	-2	86,0	4	89,0	-12
	15°C/min	C64	75,0	15	81,0	1	87,0	5	92,0	-9
		PIC255	71,0	13	75,0	-5	85,0	3	89,0	-12

Na figura 45, é apresentado a diferença das temperaturas críticas com o DSC em função da frequência em, (a) NiTi 1/PZTC-64; (b) NiTi 1/PZT-PIC255 e erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento em, (c) NiTi 1/PZTC-64 e (d) NiTi 1/PZT-PIC255.

Figura 45 - (a) Diferença de temperatura em função da frequência para NiTi 1/PZT-C64; (b) Diferença de temperatura em função da frequência para NiTi 1/PZT-PIC255; (c) Diferença de temperatura em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-C64; (d) Diferença de temperatura em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-PIC-255.

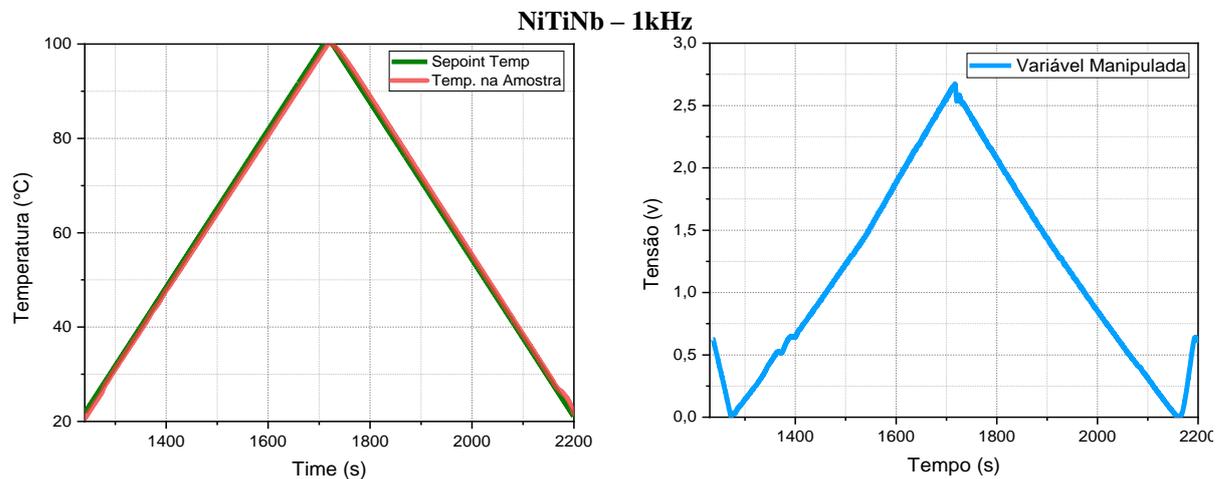


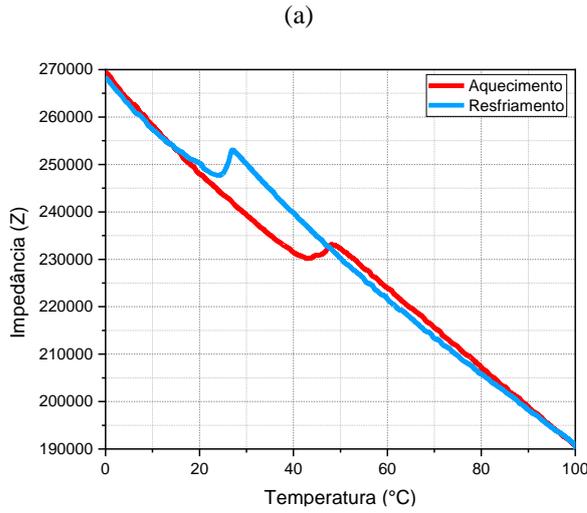


Nas figuras 46, é apresentado as respostas de magnitude de impedância em função da temperatura, a uma frequência de excitação de 1kHz, para os dois tipos de piezoelétricos (PZTs) nas heteroestruturas, NiTiNb/PZT-C64 e o NiTiNb/PZT-PIC255, respectivamente.

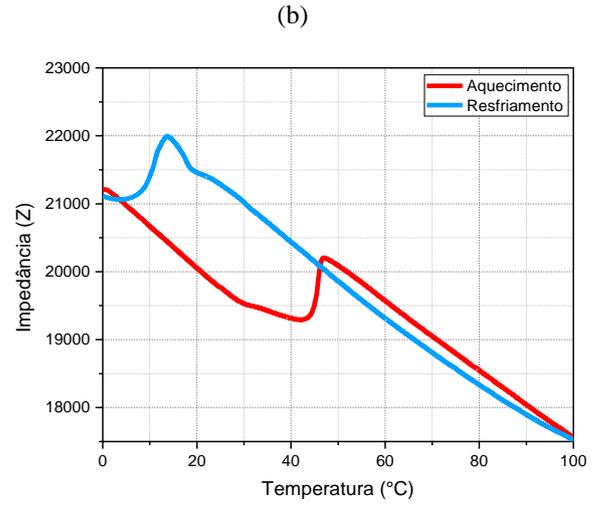
Nas duas heteroestruturas propostas, ao submetê-las ao processo de ciclagem térmica, figura 46 (a) e (b), foi observado mudanças de inclinação com dois pontos de inflexão da curva, para impedância e função da temperatura figura (c) e (d). As inclinações ocorreram muito próximas aos valores de temperaturas obtidos no DSC apresentado, sendo ainda melhor observar a derivada da impedância em função da temperatura na figura 46 (e e f). Pode ser visto também o comportamento do ângulo de fase nas duas heteroestruturas analisadas, na figura 4 (g e h). A curva de ângulo fase também apresenta picos visíveis de transformação igualmente a impedância, entre 20 e 30°C para martensita e 40 e 50°C para austenita.

Figura 46 - (a) Comportamento da temperatura controlada na heteroestrutura, (b) variável manipulada para controle da temperatura, (c) Magnitude de impedância em função da temperatura no NiTiNb/PZT-C64, (d) magnitude de impedância em função da temperatura no NiTiNb /PZT-PIC255, (e) Derivada da impedância em função da temperatura NiTiNb/PZT-C64; (f) Derivada da impedância em função da temperatura NiTiNb /PZT-PIC255; (g) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no NiTiNb/PZT-C64 e (h) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no PZT- NiTiNb/PIC255.





(a)

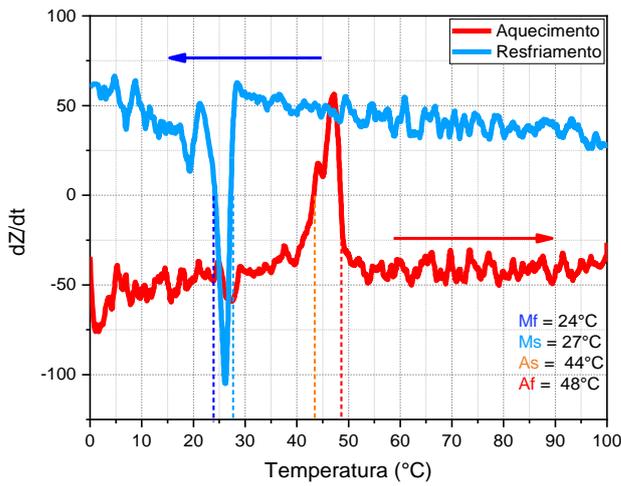


(b)

(c)

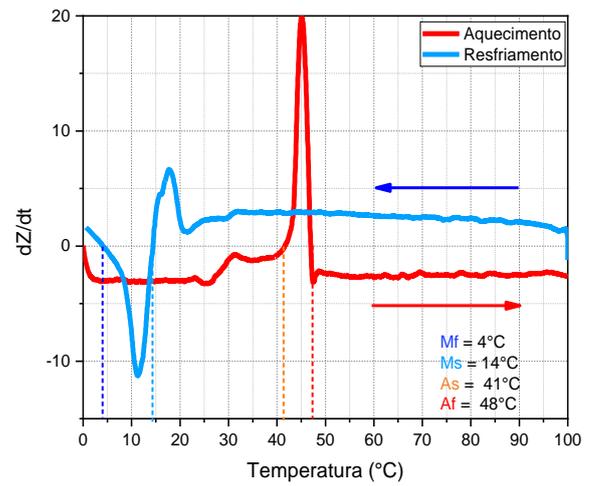
(d)

Derivada da Impedância em NiTiNb/PZT-C64



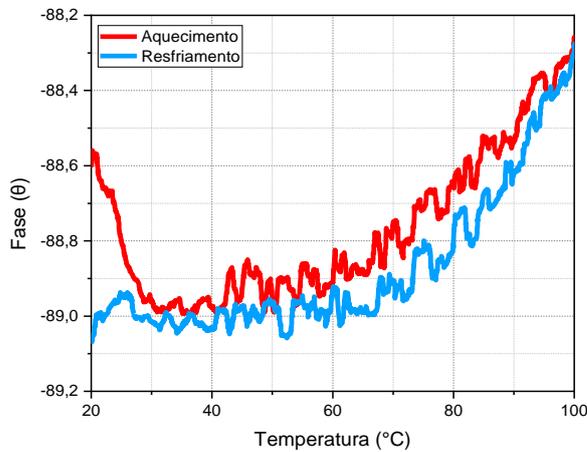
(e)

Derivada da Impedância em NiTiNb/PZT-PIC255



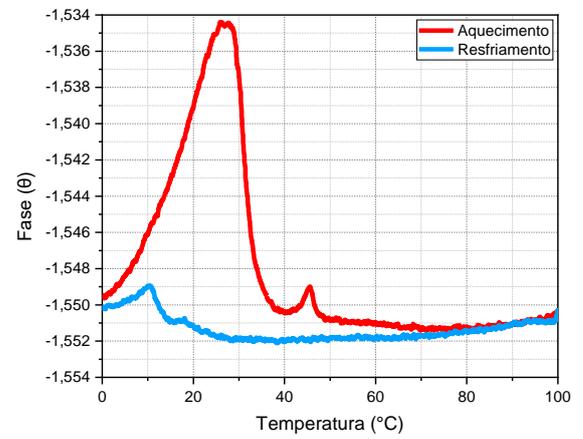
(f)

Ângulo de fase NiTiNb/PZT-C64



(g)

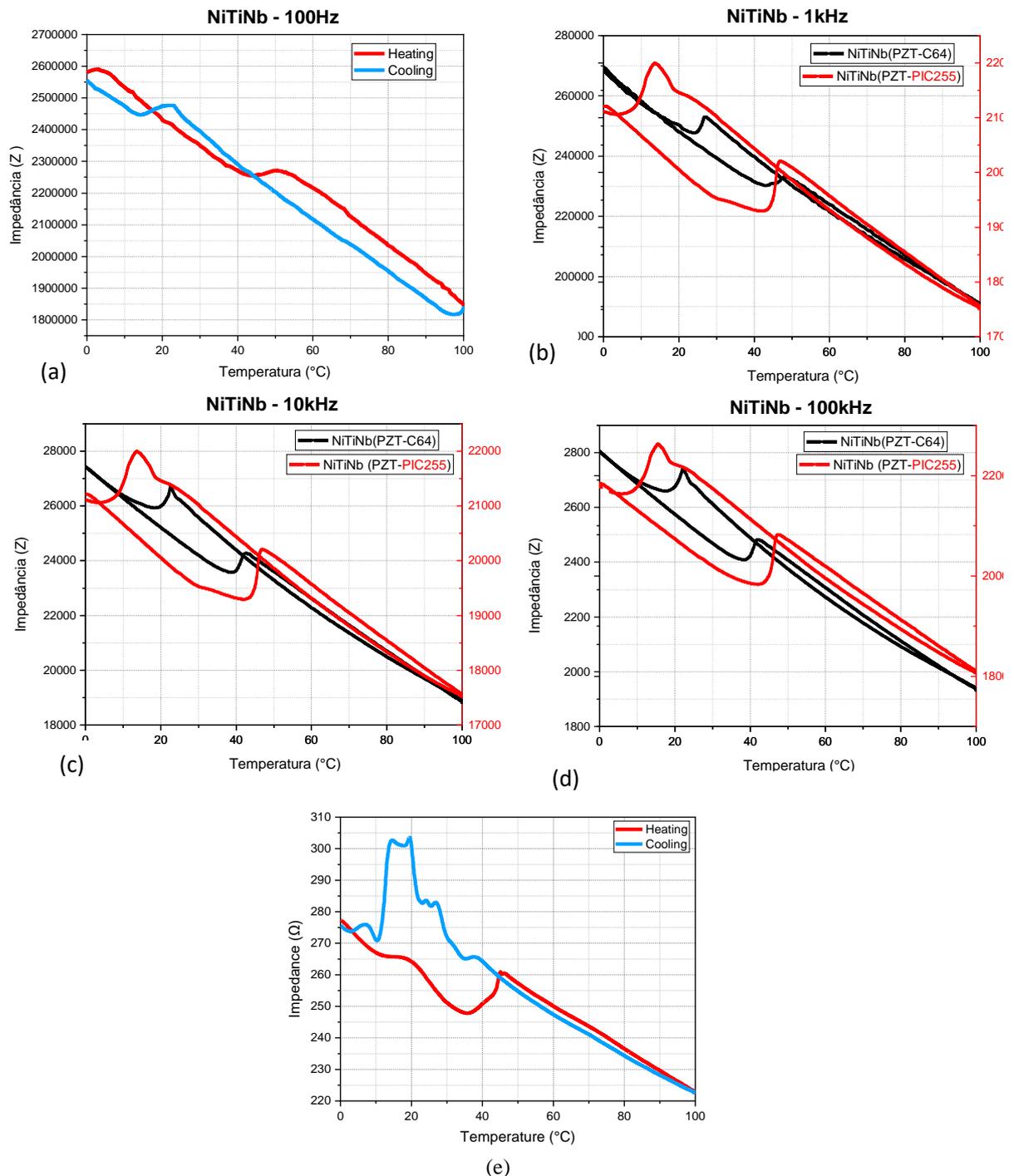
Ângulo de fase NiTiNb/PZT-PIC255



(h)

A figura 47 apresenta o comportamento da magnitude de impedância em variadas frequências de excitação, para os dois tipos de heteroestrutura, SMA/PZT-C64 e SMA/PZT-PIC255, utilizados na liga de NiTiNb. Mais especificamente em 100Hz, 1kHz, 10kHz e 100kHz a uma taxa de 10°C/min.

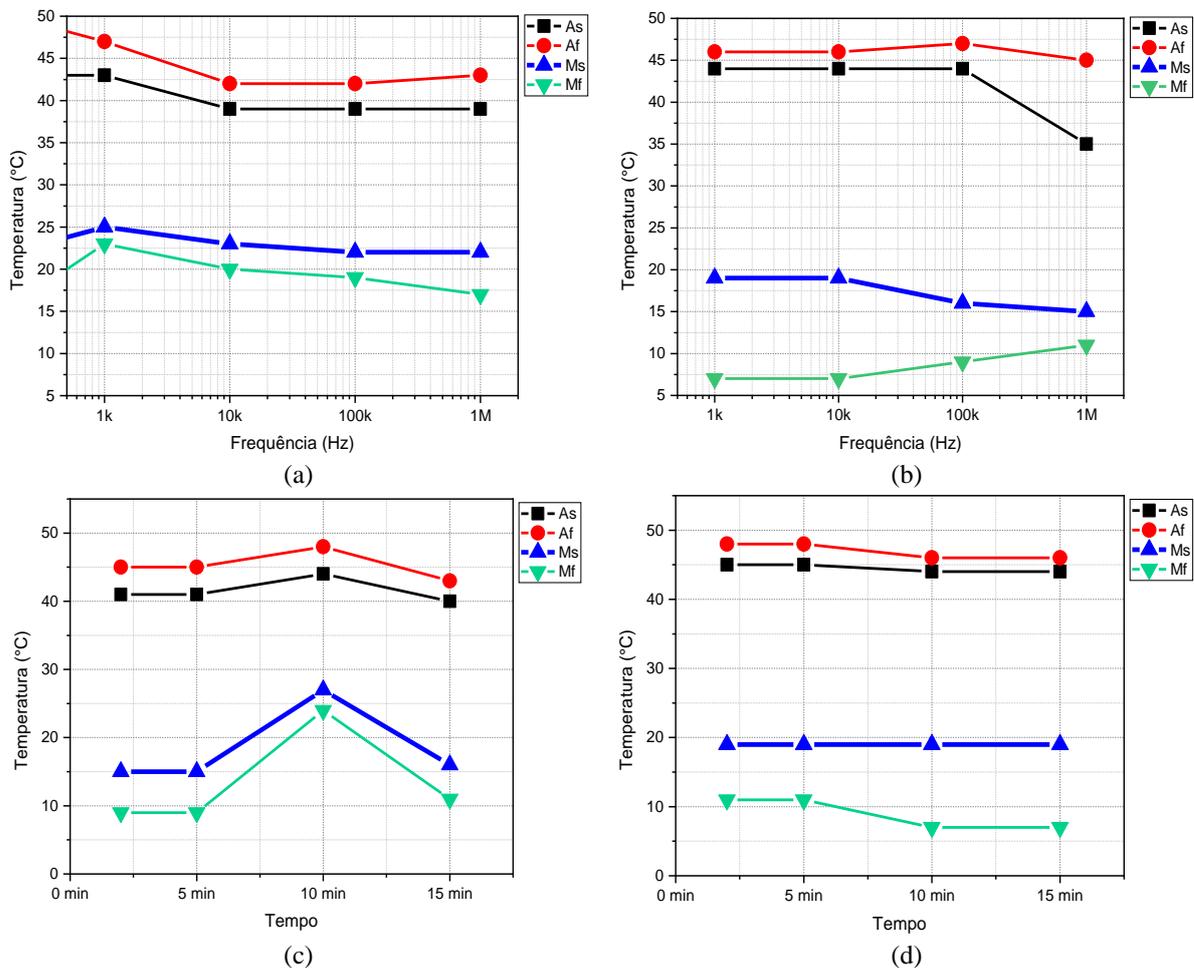
Figura 47 - (a) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 10kHz ; (d) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz e Curva de magnitude de impedância em função da temperatura NiTiNb (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1MHz.



Como observado nas ligas anteriores estudadas, todos os ciclos apresentam curvas com dois pontos de inflexão, onde estão dispostos na faixa de temperatura entre os valores obtidos no DSC. Como já comentado, é constatado que em baixas frequências do PZT fornece valores de impedância mais altos, devido natureza capacitiva do mesmo, figura 47 (a). Ainda nessa mesma figura (a) é possível detectar as transformações de fases, mesmos os picos sendo mais discretos. A partir de 1kHz os picos tornam-se mais visíveis. Na frequência de 1MHz, apesar de destorcer a atenuação e suavidade da curva, ainda é possível detectar transformação.

Para NiTiNb/PZT-C64 e NiTiNb/PZT-PIC255, a uma taxa de 10°C/min, pode ser observado na figura 48. Para as frequências de 100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz 1MHz, o comportamento de As, Af, Ms e Mf apresentam com pequenas variações entre 2 e 5°C. Para a heteroestrutura contendo o PZT-C62, figura (a) e (b), não foi possível detectar grandes variações em função da frequência. Na do PIC255 apresentou discrepância maiores em 1MHz.

Figura 48 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTiNb/PZT-C64; (b) Temperatura em função da frequência para NiTiNb/PZT- PIC255; (c) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTiNb/PZT-C64; (d) Temperatura de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTiNb/PZT-PIC255.



Elas também apresentam poucas variações com tendências de estabilidade em função da frequência. Para as figuras 48(c), apresenta um crescimento sutil de instabilidade nos ciclos em 10min. Em (d), não pequenas variações em 10 e 15min.

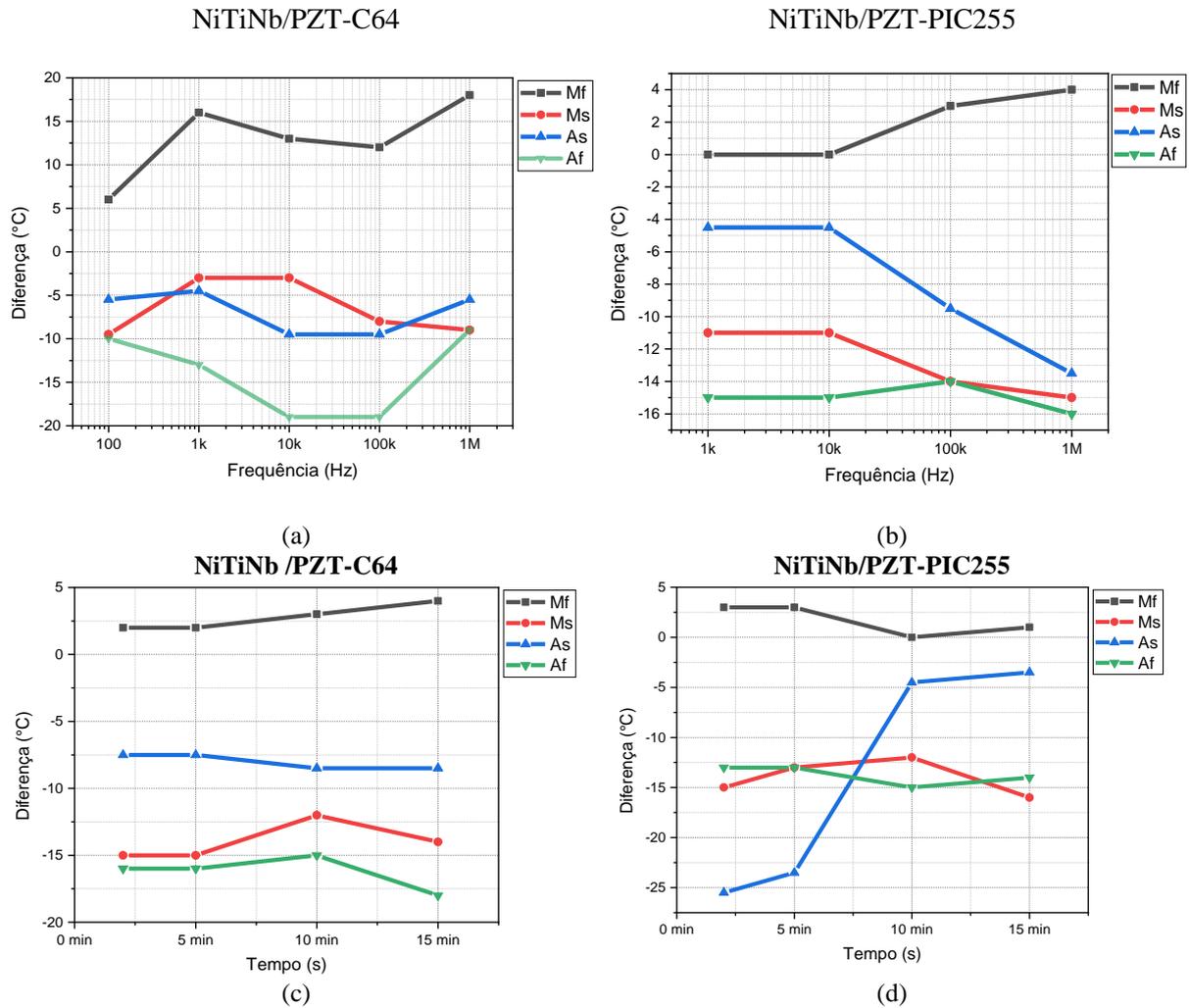
Na tabela 7 é apresentado os dados coletados e tabulados para a heteroestrutura NiTiNb/PZT-C64 e NiTiNb/PZT-PIC255 em comparativo com as temperaturas críticas das ligas monitoradas via DSC. É possível visualizar M_f , M_s , A_s e A_f para as frequências e taxas de variação de tempo propostas para análise. Ainda foi calculado a diferença entre a técnica de EMIH e o DSC.

Tabela 7 - Análise das temperaturas críticas da NiTiNb/PZT-C64 e PIC255

	Transformation	M_f	Dif. (DSC)	M_s	Dif. (DSC)	A_s	Dif. (DSC)	A_f	Dif. (DSC)	
	DSC	7°C		30°C		48,5°C		61°C		
Frequency - 10°C/min	100Hz	C64	13,0	6	20,5	-9,5	43,0	-5,5	51,0	-10
		PIC255								
	1kHz	C64	23,0	16	27,0	-3	44,0	-4,5	48,0	-13
		PIC255	7,0	0	19,0	-11	44,0	-4,5	46,0	-15
	10kHz	C64	20,0	13	27,0	-3	39,0	-9,5	42,0	-19
		PIC255	7,0	0	19,0	-11	44,0	-4,5	46,0	-15
	100kHz	C64	19,0	12	22,0	-8	39,0	-9,5	42,0	-19
		PIC255	9,0	3	16,0	-14	39,0	-9,5	47,0	-14
	1MHz	C64	18,0	18	21,0	-9	43,0	-5,5	52,0	-9
		PIC255	11,0	4	15,0	-15	35,0	-13,5	45,0	-16
		Transformation	M_f	Dif. (DSC)	M_s	Dif. (DSC)	A_s	Dif. (DSC)	A_f	Dif. (DSC)
		DSC	7°C		30°C		48,5°C		61°C	
Time Rate - 1kHz	2°C/min	C64	9,0	2	15,0	-15	41,0	-7,5	45,0	-16
		PIC255	10,0	3	15,0	-15	23,0	-25,5	48,0	-13
	5°C/min	C64	9,0	2	15,0	-15	41,0	-7,5	45,0	-16
		PIC255	10,0	3	18,0	-13	25,0	-23,5	48,0	-13
	10°C/min	C64	10,0	3	19,0	-12	40,0	-8,5	46,0	-15
		PIC255	7,0	0	19,0	-12	44,0	-4,5	46,0	-15
	15°C/min	C64	11,0	4	16,0	-14	40,0	-8,5	43,0	-18
		PIC255	8,0	-1	14,0	-16	45,0	-3,5	47,0	-14

Na figura 49, é apresentado a diferença das temperaturas críticas com o DSC em função da frequência em, (a) NiTiNb/PZTC-64 e em (b) NiTiNb/PZT-PIC255. Também apresenta a diferença de temperatura em função da taxa de aquecimento e resfriamento em, (c) NiTiNb/PZTC-64 e (d) NiTi/NbPZT-PIC255.

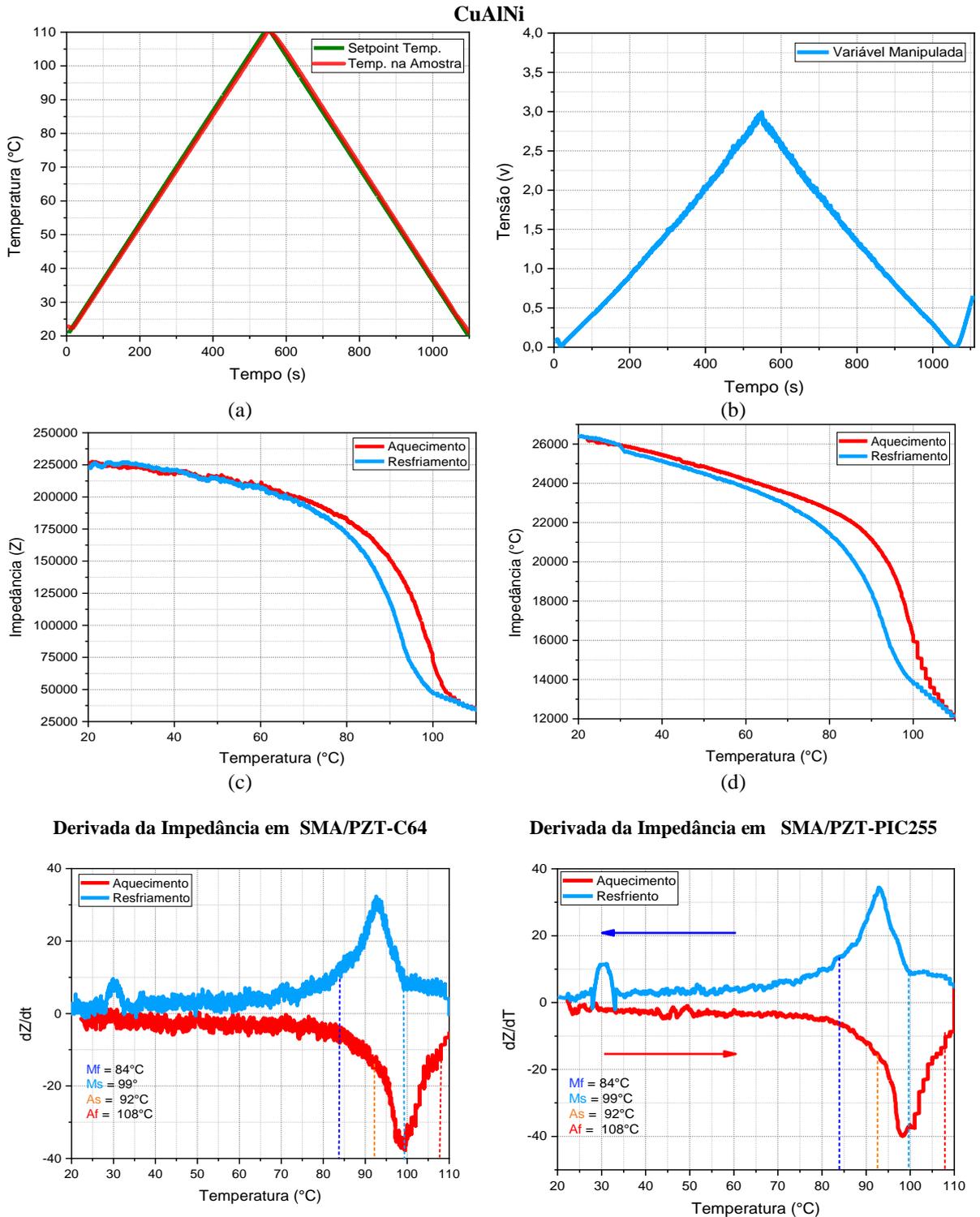
Figura 49 - (a) Diferença de temperatura em função da frequência para NiTi 1/PZT-C64; (b) Diferença de temperatura em função da frequência para NiTi 1/PZT-PIC255; (c) Diferença de temperatura em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-C64; (d) Diferença de temperatura em função da taxa de aquecimento e resfriamento para NiTi 1/PZT-PIC-255.

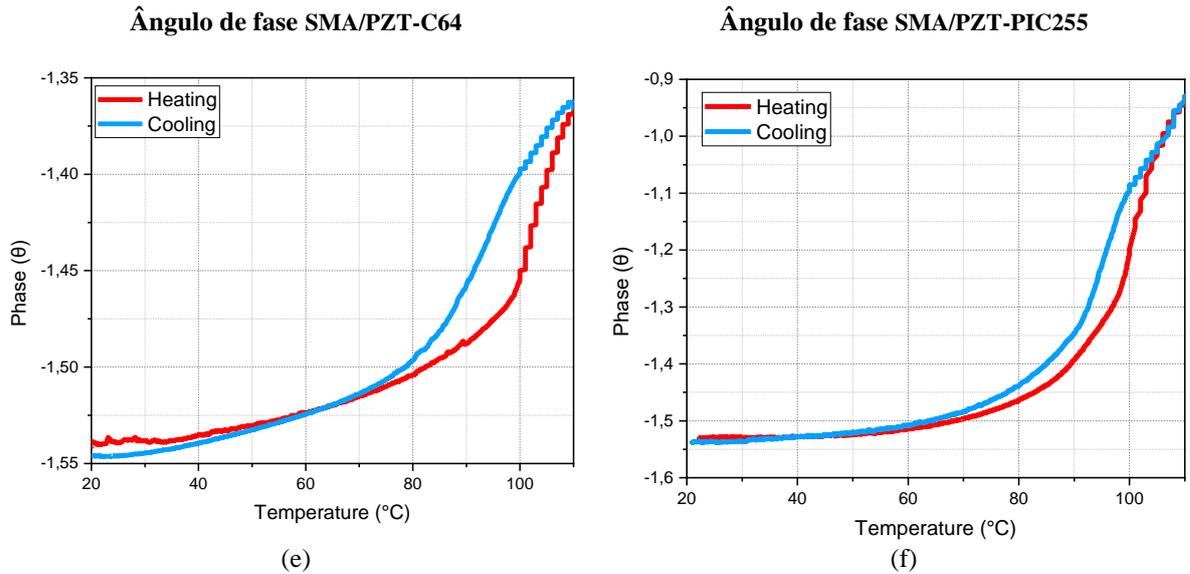


Nas figuras 50, é apresentada as respostas de magnitude de impedância em função da temperatura, a uma frequência de excitação de 1kHz, para os dois tipos de piezoelétricos (PZTs) nas heteroestruturas, CuAlNi/PZT-C64 e o CuAlNi/PZT-PIC255, respectivamente.

Nas duas heteroestruturas propostas, ao submete-las ao processo de ciclagem térmica, figura 50 (a) e (b), foi observado uma histerese com mudanças de inclinação na curva, para impedância e função da temperatura figura (c) e (d), entre 70 e 110°C. As inclinações ocorreram muito próximas aos valores de temperaturas obtidos no DSC apresentado. Também na figura 50 (e e f), a derivada da impedância em função da temperatura. Pode ser visto o comportamento do ângulo de fase nas duas heteroestruturas analisadas, na figura 50 (g e h).

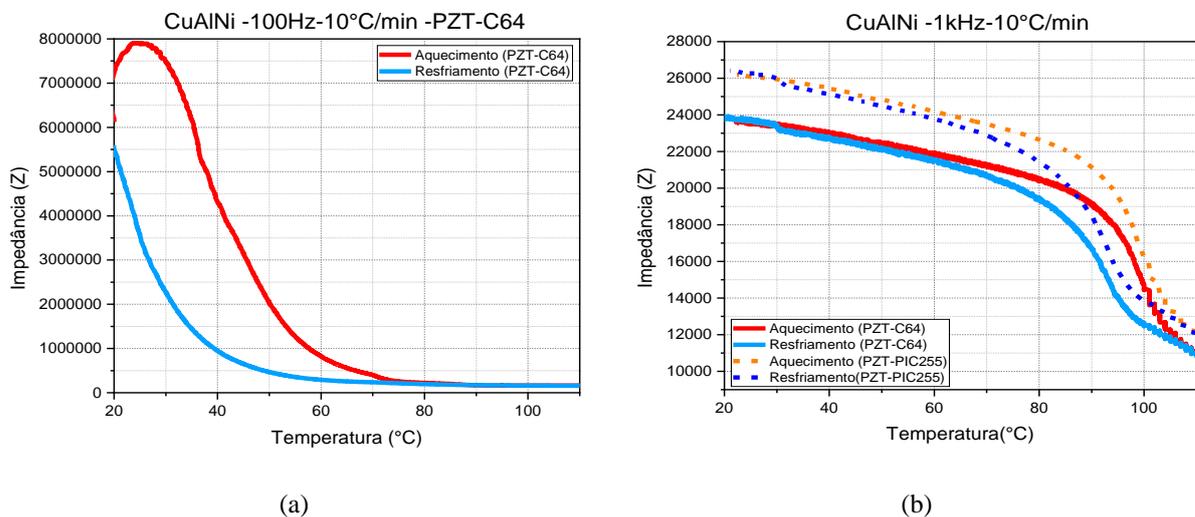
Figura 50 - (a) Comportamento da temperatura controlada na heteroestrutura, (b) variável manipulada para controle da temperatura, (c) Magnitude de impedância em função da temperatura no CuAlNi/PZT-C64, (d) magnitude de impedância em função da temperatura no CuAlNi/PZT-PIC255, (e) Derivada da impedância em função da temperatura CuAlNi/PZT-C64; (f) Derivada da impedância em função da temperatura CuAlNi/PZT-PIC255; (g) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no CuAlNi/PZT-C64 e (h) Curva de ângulo de fase em função da temperatura no PZT- CuAlNi/PIC255.

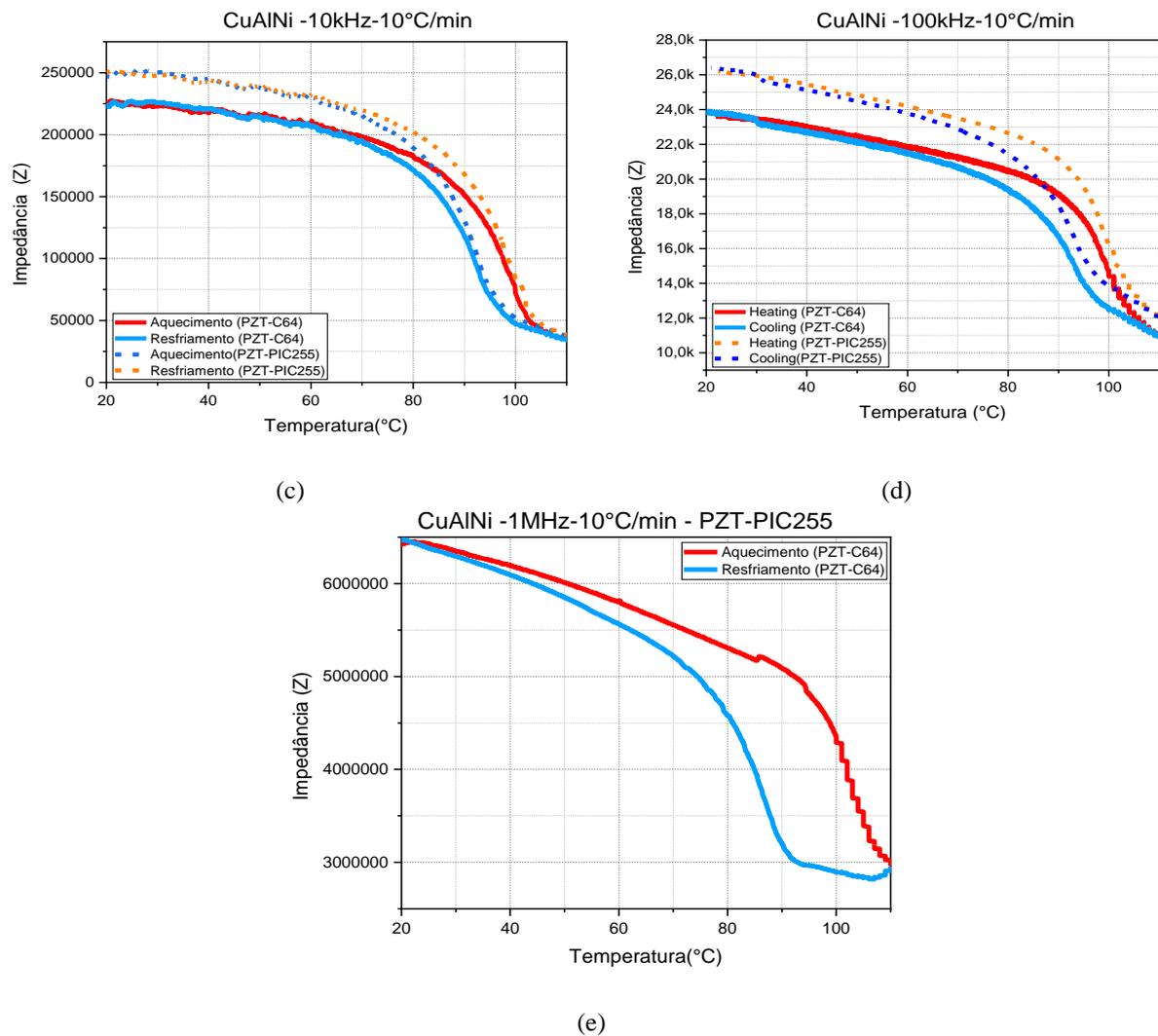




Como observado nas ligas anteriores estudadas, todos os ciclos apresentam curvas com dois pontos de inflexão, onde estão dispostos na faixa de temperatura entre os valores obtidos no DSC. Como também já comentado, é constatado que em baixas frequências do PZT fornece valores de impedância mais altos, figura 51 (a). Ainda nessa mesma figura (a), não foi possível detectar as transformações de fases devido à baixa frequência, mesmos havendo inclinação na curva. A partir de 1kHz, figura (c) e (d), os picos tornam-se mais visíveis para os dois PZT's, sendo totalmente compatível as inclinações com as temperaturas críticas. Na frequência de 1MHz, apesar de distorcido a curva, ainda é possível detectar as transformações com muita clareza.

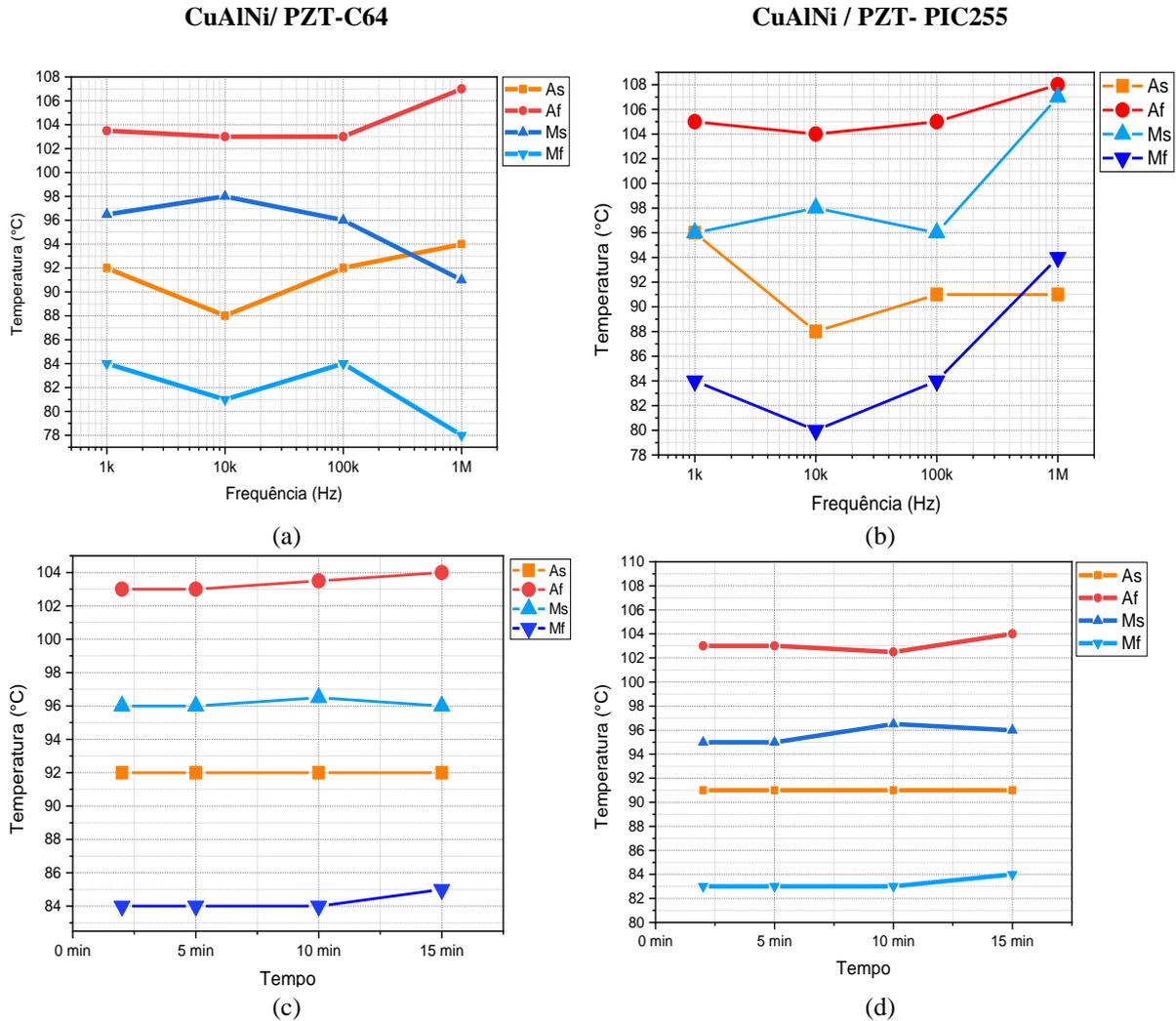
Figura 51 - (a) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-C64) em 100Hz, (b) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 1kHz, (c) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 10kHz; (d) Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-C64 e PZT-PIC255) em 100kHz e Curva de magnitude de impedância em função da temperatura CuAlNi (PZT-PIC255) em 1MHz





Para CuAlNi/PZT-C64 e CuAlNi/PZT-PIC255, a uma taxa de 10°C/min, pode ser observado na figura 52. Para as frequências de 100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz 1MHz, o comportamento de A_s , A_f , M_s e M_f apresentam pequenas variações. Para a heteroestrutura contendo o PZT-C, figura (a) e (b), não foi possível detectar grandes variações em função da frequência, porém em 1Mhz houve maior discrepância para outras frequências analisadas. Na do PIC255 apresentou discrepância maiores em 100hz e em 1MHz, onde maior estabilidade em 1khz, 10kHz e 100kHz. Para as figuras 52(c), não apresenta mudança em função do tempo e em (d), crescimento sutil de instabilidade para M_s em 10min/°C.

Figura 52 - (a) Temperatura em função da frequência para NiTiNb/PZT-C64; (b) Temperatura em função da frequência para CuAlNi/PZT- PIC255; (c) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para CuAlNi/PZT-C64; (d) Temperaturas de transformação de fase em função da taxa de aquecimento resfriamento para NiTiNb/PZT-PIC255.



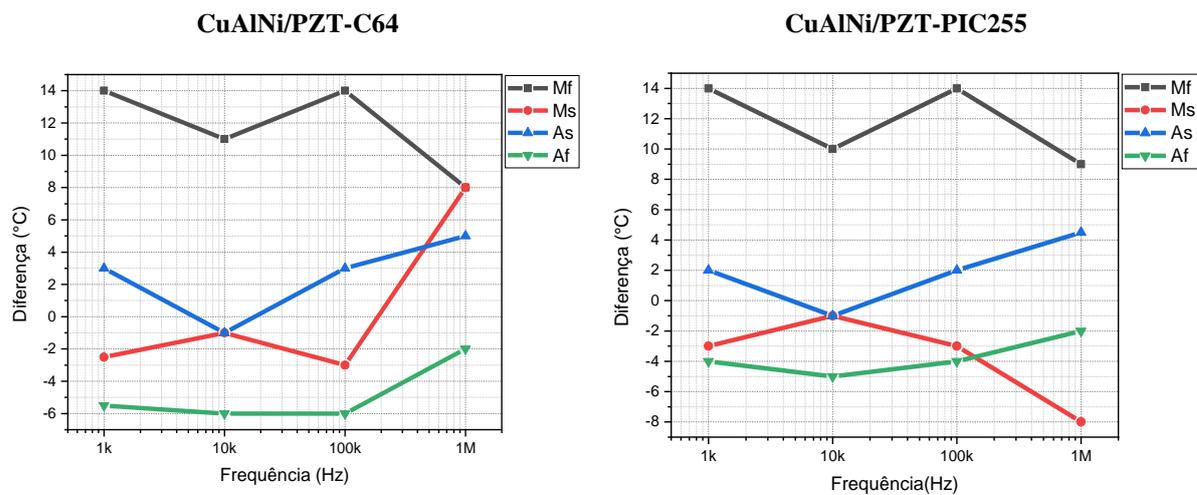
Na tabela 8 é apresentado os dados coletados e tabulados para a heteroestrutura CuAlNi/PZT-C64 e CuAlNi /PZT-PIC255 em comparativo com as temperaturas críticas das ligas monitoradas via DSC. É possível visualizar Mf, Ms, As e Af para as frequências e taxas de variação de tempo propostas para análise. Também pode ser observado a diferença entre EMIH e DSC.

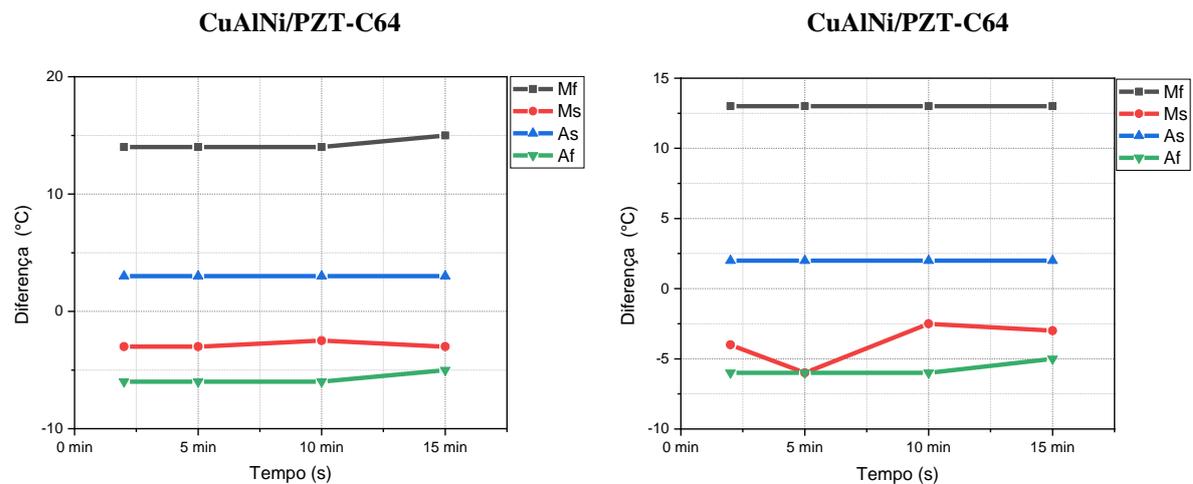
Tabela 8 - Análise das temperaturas críticas da CuAlNi/PZT-C64 e PIC255.

	Transformation	Mf	Dif. (DSC)	Ms	Dif. (DSC)	As	Dif. (DSC)	Af	Dif. (DSC)	
	DSC	70°C		99°C		89°C		109°C		
Frequency - 10°C/min	100Hz	C64	--	--	--	--	--	--	--	
		PIC255	--	--	--	--	--	--	--	
	1kHz	C64	84,0	14	96,5	-2,5	92,0	3	103,5	-5,5
		PIC255	84,0	14	96,0	-3	91,0	2	105,0	-4
	10kHz	C64	81,0	11	98,0	-1	88,0	-1	103,0	-6
		PIC255	80,0	10	98,0	-1	88,0	-1	104,0	-5
	100kHz	C64	84,0	14	96,0	-3	92,0	3	103,0	-6
		PIC255	84,0	14	96,0	-3	91,0	2	105,0	-4
	1MHz	C64	78,0	8	91,0	-8	94,0	5	107,0	-2
		PIC255	79,0	9	91,0	-8	93,5	4,5	107,0	-2
		Transformation	Mf	Dif. (DSC)	Ms	Dif. (DSC)	As	Dif. (DSC)	Af	Dif. (DSC)
		DSC	70°C		99°C		89°C		109°C	
Time Rate - 1kHz	2°C/mi	C64	84,0	14	96,0	-3	92,0	3	103,0	-6
	n	PIC255	83,0	13	95,0	-4	91,0	2	103,0	-6
	5°C/mi	C64	84,0	14	96,0	-3	92,0	3	103,0	-6
	n	PIC255	83,0	13	93,0	-6	91,0	2	103,0	-6
	10°C/m	C64	84,0	14	96,5	-2,5	92,0	3	103,0	-6
	in	PIC255	83,0	13	96,5	-2,5	91,0	2	103,0	-6
	15°C/m	C64	85,0	15	96,0	-3,0	92,0	3	104,0	-5
	in	PIC255	83,0	13	96,0	-3,0	91,0	2	104,0	-5

Na figura 53, é apresentado a diferença das temperaturas críticas com o DSC, em função da frequência em, (a) NiTiNb/PZTC-64 e em (b) NiTi/PZT-PIC255. Também apresenta o erro em função da taxa de aquecimento e resfriamento em, (c) NiTi/PZTC-64 e (d) NiTi/PZT-PIC255.

Figura 53 - (a) Diferença de temperatura em função da frequência para CuAlNi/PZT-C64; (b) Diferença de temperatura em função da frequência para CuAlNi /PZT-PIC255; (c) Diferença de temperatura em função da taxa de aquecimento e resfriamento para CuAlNi /PZT-C64; (d) Diferença de temperatura em função da taxa de aquecimento e resfriamento para CuAlNi /PZT-PIC-255.



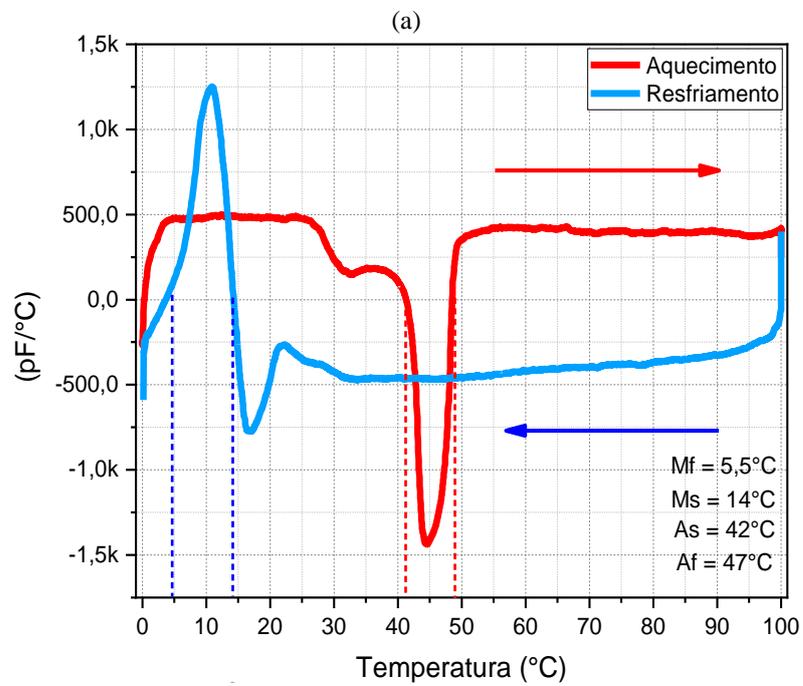
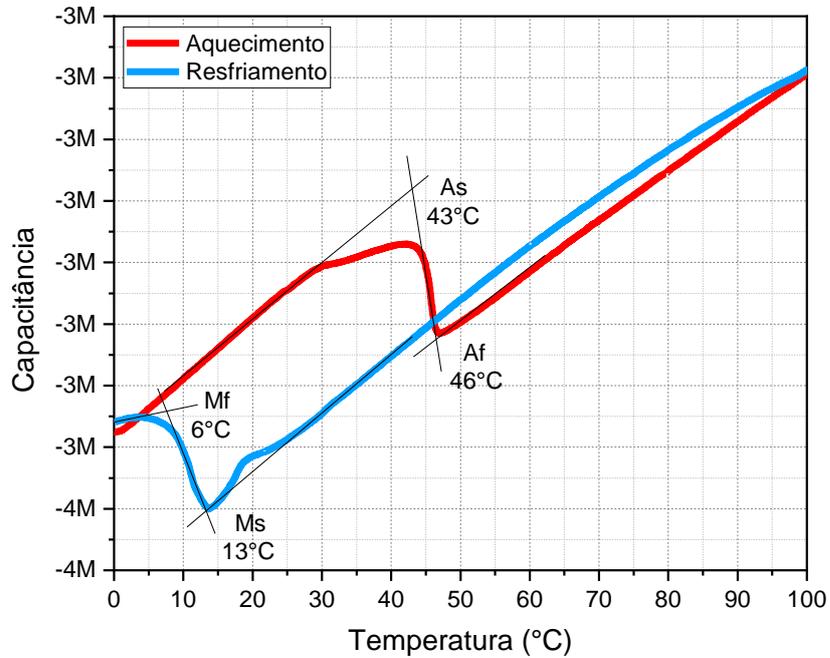


Nas análises realizadas foi possível observar que a capacitância se comporta de maneira linear, diferentemente da resistência, na cerâmica PZT-C64 e PIC255. Coletando a resistência elétrica, a reatância capacitiva e o ângulo de fase, foi calculado a capacitância. Foi constatado também nas análises que a reatância capacitiva e a impedância são similares, onde essa mesma paridade acontece entre o ângulo de fase e a resistência nas heteroestruturas, apresentando mudanças de inclinação com dois pontos de inflexão da curva, similar a capacitância, figura 54. Isso é análogo ao RET, porém, foi possível observar que a resistência apresenta variações que não são correlacionadas à transformação, que podem ser atribuídas tanto à irregularidade da resistência do piezoelétrico, por ser uma cerâmica, tanto ao próprio comportamento do material de liga de memória de forma poder apresentar irregularidades no comportamento da sua resistência elétrica. Dessa forma, é possível se ter uma ideia que existe uma transformação de fase através da resistência, porém é um resultado inconclusivo.

A transformação de fase das amostras se torna evidente tanto na magnitude da impedância, como na capacitância, esse efeito acontece, pois, a impedâncias das heteroestruturas é majoritariamente reativa. No entanto, a capacitância da cerâmica é o parâmetro de natureza linear, logo este é o parâmetro ideal para análise, já que a impedância incorpora traços do comportamento da resistência elétrica. Sabendo que o material piezoelétrico é um transdutor eletromecânico, a sua capacitância, que representa sua parcela reativa, irá variar quando o material sofre uma tensão mecânica. Além disso, a transformação de fase de um material com liga de memória de forma é a transição de uma estrutura cristalográfica para outra, ou seja, existe uma movimentação mecânica interna ao material, essas mudanças causa a aplicação de tensões na estrutura piezoelétrica, assim alterando a sua impedância elétrica. Na figura 54, foi derivada a curva de capacitância do material em função da temperatura, essa

análise permite através do comportamento da heteroestrutura e definir diretamente os pontos em que estão acontecendo as transformações de fase, devido a sua mudança abrupta de sentido de inclinação. As curvas são apresentadas abaixo.

Figura 54 - Capacitância da liga Ni-Ti-NB(a) e sua Derivada (b)



(b)

Capítulo 6 - Considerações Finais

Neste capítulo final, é agrupada uma descrição sucinta e concisa das etapas realizadas ao longo desta Tese e as principais conclusões. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, abarcando a mesma linha de pesquisa.

6.1. Conclusões

Neste trabalho de pesquisa, a qual resulta a tese de doutorado, teve como objetivo investigar o uso da técnica de impedância eletromecânica (EMI) como ferramenta aliada para medir temperaturas de transformação de fase das SMAs (Shape Memory Alloys) em uma heteroestrutura formada por material piezoelétrico e material de liga com memória de forma (heteroestrutura).

Nessa perspectiva, foi projetado, desenvolvido e caracterizado um equipamento capaz de realizar ciclagem térmica em heteroestruturas entre 100°C e -20°C. Os resultados obtidos nos permitem afirmar que módulos termoeletrônicos de Peltier são perfeitamente aplicáveis na caracterização térmica de ligas de memória de forma. O equipamento proposto mostrou-se satisfatório, atingindo as temperaturas desejadas entre 100°C e -20°C, mesmo apresentando um gradiente de temperatura considerável em alguns pontos medidos. A taxa de variação de temperatura medida apresentou-se em aproximadamente 15°C.

O tamanho da amostra utilizado também gera influência quanto a sua carga térmica no equipamento, de modo que, enquanto maior suas dimensões, maior trabalho deverá ser aplicado para atingir a baixa temperatura desejada. O gradiente de temperatura na superfície do Peltier também pode gerar diferentes temperaturas na amostra de dimensões maiores, podendo ocasionar transformações indesejadas. Logo, conclui-se que o uso da amostra em pequenas dimensões, seja o ideal. Os termopares devidamente fixados sobre o protótipo termoeletrônico tiveram excelente desempenho de leitura com precisão adequada (0,5°C).

A implementação do controlador PID digital, ocorreu de maneira satisfatória, tendo em vista sua resposta de regime transitório e permanente junto a variável controlada, a temperatura. A interface gráfica do usuário desenvolvida no LabView®, possibilitou o monitoramento, controle, ciclagem térmica a taxas variáveis de tempo e armazenamento das grandezas físicas analisadas em tempo real com alto nível de precisão, apresentando bom nível de usabilidade do sistema e reprodutibilidade para ensaio futuros.

Foi possível determinar as curvas características do comportamento da impedância eletromecânica em função da temperatura da LMF. Os resultados demonstram claramente que os loops de histerese por EMIH estão relacionados com as mudanças de rigidez durante a formação da fase, ocorrendo mais rapidamente do que o processo térmico visto por DSC. Com a técnica de EMIH, é possível extrair essas propriedades de heteroestruturas com diferentes geometrias e tamanhos, ao contrário do DSC que possui limitação para o tamanho da amostra analisada.

Outras métricas como a derivada da impedância, ângulo de fase, resistência, capacitância e derivada da capacitância também foram examinadas a fim de descrever formas alternativas para medir as temperaturas de transformação de SMAs. Todos eles confirmam os resultados das curvas de magnitude de impedância, uma vez que todas as formas de loop são similares. Vale ressaltar que PZT/Cobre, PZT/Aço, e os resultados de PZT/Latão provam que a histerese e o comportamento do loop por amostras de PZT/SMA são devidas à transformação de fase em SMA.

Apesar do EMIH apresentar alguns inconvenientes, como a necessidade de acoplar um sensor piezoelétrico para a amostra SMA, o método pode ser facilmente implementado com qualquer sistema eletrônico de medição de impedância, tornando-se assim uma alternativa na determinação de temperaturas de transformação de fase SMA. Este trabalho tem uma contribuição científica relevante, uma vez que a tecnologia baseada em impedância foi relatada na literatura para este fim apenas uma vez de maneira embrionária.

Algumas diferenças podem ser encontradas nas temperaturas críticas analisadas quando comparadas ao DSC. Em grande parte essa diferença está na variação da efetividade do transporte térmico e com a variabilidade da impedância elétrica, da amostra em análise em função da temperatura.

Melhorias futuras na metodologia EMIH podem ser alcançadas por meio de testes de diferentes composições de materiais, bem como diferentes formas geométricas. Além disso, pequenos circuitos individuais poderiam substituir o analisador de impedância, proporcionando uma configuração laboratorial mais barata.

6.2. Sugestões e Trabalhos Futuros

O tema abordado nesta tese tem caráter multidisciplinar e propicia uma linha de estudos abrangente, uma vez que possui alto grau de complexidade com a prerrogativa de progredir além da fronteira do conhecimento científico. Logo, proponho para trabalhos futuros:

- Analisar ligas com composições distintas e comparar com os resultados já obtidos;
- Analisar ligas que possuam transformações de fases em mais de um estágio;
- Analisar de maneira mais efetiva a influencia da geometria e dimensões, da amostra, e PZT utilizado;
- Desenvolver circuitos mais simples, porém efetivos, para medição de impedância e capacitância;
- Inserir no dispositivo estudado uma análise de campo magnético para estudos em LMF termomagnéticas.

6.3. Referências Bibliográficas

- BAPTISTA, F.; ON, J. V. F.-I. T.; 2009, U. A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring. **ieeexplore.ieee.org**, 2009.
- BHALLA, S. et al. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE. **spiedigitallibrary.org**, 2018.
- BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G. A Comparative Study of Impedance Measurement Techniques for Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 67, n. 4, p. 912–924, 2018.
- CAMPEIRO, L. M.; DA SILVEIRA, R. Z. M.; BAPTISTA, F. G. Impedance-based damage detection under noise and vibration effects. **Structural Health Monitoring**, v. 17, n. 3, p. 654–667, 2018.
- CHENG, F.; JIANG, H.; LOU, K. Smart structures: innovative systems for seismic response control. 2008.
- CHINA, I. P.-I.; 2011, UNDEFINED. Ceramic based intelligent piezoelectric energy harvesting device. **books.google.com**, [s.d.].
- CHOUDHARY, N.; KAUR, D. **Fabrication and characterization of SMA/PZT thin film heterostructures**. AIP Conference Proceedings. **Anais...**2010.
- CHOUDHARY, N.; PHYSICAL, D. K.-S. AND A. A.; 2016, UNDEFINED. Shape memory alloy thin films and heterostructures for MEMS applications: A review. **Elsevier**, [s.d.].
- CORTEZ-VEGA, R. et al. A hybrid dynamic model of shape memory alloy spring actuators. **Elsevier**, [s.d.].
- CUNHA, M. F. et al. Transformation temperatures of shape memory alloy based on electromechanical impedance technique. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 145, p. 55–62, 2019.
- DA ROCHA SOUTO, C. et al. Thermal cycling effect on a shape memory and piezoelectric heterostructure. **Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**, p. 315–319, 2014.
- DE FREITAS, E. S. et al. Equivalent Circuit of Piezoelectric Diaphragms for Impedance-Based Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 17, p. 5537–5546, 2017.
- E. Zanaboni, One Way and Two Way-Shape Memory Effect..** Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=E.+Zanaboni%2C+One+Way+and+Two+WayShape+Memory+Effect%3A+ThermoMechanical+Characterization+of+NiTi+Wires%2C+Universita+degli+Studi+di+Pavia%2C+Pavia%2C+Italy%2C+2008.&btnG=>>. Acesso em: 21 jun. 2021.
- EMILIAVACA, A. et al. Characterization of shape memory alloy micro-springs for application in morphing wings Recent citations Characterization of shape memory alloy micro-springs for application in morphing wings. **iopscience.iop.org**, 2018.

ERTÜRK, A. (2011) “A C. P. I. THE O. D. A. OF C. AND T. IN A. TCC de Maxuel. **Ekp**, v. 13, n. 3, p. 1576–1580, 2017.

FARRAR, C.; WORDEN, K. Structural health monitoring: a machine learning perspective. 2012.

GAO, W. et al. Smart concrete slabs with embedded tubular PZT transducers for damage detection. **Smart Materials and Structures**, v. 27, n. 2, 2018.

GIURGIUTIU, V. **PVP2010-25292 PIEZOELECTRIC WAFER ACTIVE SENSORS FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING-STATE OF THE ART AND FUTURE DIRECTIONS**. [s.l: s.n.].

GONÇALVES, A. et al. Active vibration control in a two degrees of freedom structure using piezoelectric transducers associated with negative capacitance shunt circuits. **International Journal of Dynamics and Control**, v. 9, n. 1, p. 71–84, 1 mar. 2021.

JORDAN, T. L. **Piezoelectric Ceramics Characterization**. [s.l: s.n.].

JÚNIOR, J. M. **JOSÉ DOS REIS VIEIRA DE MOURA JÚNIOR UMA CONTRIBUIÇÃO AOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL APLICADA A ESTRUTURAS AERONÁUTICAS E ESPACIAIS UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA 2008**. [s.l: s.n.].

KIM, H. et al. Performance assessment method for crack repair in concrete using PZT-based electromechanical impedance technique. **NDT and E International**, v. 104, n. April, p. 90–97, 2019.

KIM, J. et al. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. **Elsevier**, 2003.

KOO, K.-Y. et al. Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects. **journals.sagepub.com**, v. 20, n. 4, p. 367–377, mar. 2009.

LAGOUDAS, D. Shape memory alloys: modeling and engineering applications. 2008.

LAW, W. W.; LIAO, W.-H.; HUANG, J. Active self-sensing scheme development for structural health monitoring Related content Vibration control of structures with self-sensing piezoelectric actuators incorporating adaptive mechanisms. **iopscience.iop.org**, 2006.

LEO, D. J. **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. [s.l.] John Wiley and Sons, 2008.

LI, W. et al. PZT based smart corrosion coupon using electromechanical impedance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 129, p. 455–469, 2019.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems - determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 8, n. 4, p. 335–343, 1997.

LIANG, Y. et al. Bond-slip detection of concrete-encased composite structure using electro-mechanical impedance technique. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 9, 2016.

- LIU, Y. et al. Some aspects of the properties of NiTi shape memory alloy. **Elsevier**, 1997.
- MAIA, N. et al. Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods. **Elsevier**, 2003.
- MANFREDI, L. et al. Low power consumption mini rotary actuator with SMA wires. **iopscience.iop.org**, 2017.
- MEHTA, K.; GUPTA, K. **Fabrication and Processing of Shape Memory Alloys**. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- MOHEIMANI, S. O. R.; FLEMING, A. J. **Piezoelectric...** - **Google Acadêmico**. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=MOHEIMANI%2C+S.+O.+R.%3B+FLEMING%2C+A.+J.+Piezoelectric+Transducers+for+Vibration+Control+and+Damping%2C+2006.+School+of+Electrical+Engineering+and+Computer+Science%2C+University+of+Newcastle%2C+Australia.+Editora+Springer%2C+p.+279.+ISBN+978-1-84628-331-4.&btnG=>>. Acesso em: 25 jun. 2021.
- NOKES, J.; MECHANICS, G. C.-E.; 1993, UNDEFINED. The application of interferometric techniques to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials. **Springer**, [s.d.].
- OWOLABI, G.; SWAMIDAS, A.; SESHADRI, R. Detecção de rachaduras em feixes usando mudanças nas frequências e amplitudes das funções de resposta de frequência. **Jornal de som e vibração**, 2003.
- PALACZ, M.; VIBRATION, M. K.-J. OF S. AND; 2002, U. Vibration parameters for damage detection in structures. **mostwiedzy.pl**, 2002.
- PARK, G. et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. **Citeseer**, 2003.
- PARK, G. et al. Recent citations. **iopscience.iop.org**, 2006.
- PARK, G.; INMAN, D. J. **IMPEDANCE-BASED STRUCTURAL HEALTH MONITORING** **Wiley Online Library**. [s.l: s.n.].
- PIERRE BATISTA DOS REIS, R. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoelétrico**. [s.l: s.n.].
- PITA, J. L.; TURRA, A. E.; VIEIRA FILHO, J. Detecção de danos em tubulações usando a técnica baseada na impedância eletromecânica (EMI). **proceedings.sbmac.emnuvens.com ...**, 2013.
- RANGEL, R. F. et al. **Development and characterization of an electric power generator using piezoelectric (PZT) subjected to base excitation**. I2MTC 2017 - 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 5 jul. 2017.
- RAO, ASHWIN AND SRINIVASA, ARUN RAMASWAMY AND REDDY, J. N. **Design of shape memory alloy (SMA) actuators**. [s.l.] Springer International Publishing, 2015.

RYTTER, A. Vibracional inspeção com base de estruturas de engenharia civil. 1993.

SAMANTARAY, S.; MITTAL, S. K.; KUMAR, S. Electromechanical impedance method for monitoring incipient looseness in jointed structure for railway safety. **6th International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2017**, v. 2018- Janua, p. 805–809, 2018.

SHAHAB, S.; ERTURK, A. Coupling of experimentally validated electroelastic dynamics and mixing rules formulation for macro-fiber composite piezoelectric structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 12, p. 1575–1588, 1 jul. 2017.

SILVA, A.; SILVA, S. DA. Controle difuso de um dedo robótico acionado por fios de liga com memória de forma. **Jornal de**, 2018.

SILVA, D. D. S. et al. Application of electromechanical impedance technique in the monitoring of sigma phase embrittlement in duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 788, n. January, 2020.

SILVA, K.; JUNIOR, V. S. “SISTEMA TERMOELÉTRICO APLICADO AO ESTUDO DOS EFEITOS DE CONGELAMENTO E DE PROPRIEDADES TÉRMICAS” **CAMPINAS 2012**. [s.l: s.n.].

SRIVASTAVA, S.; BHALLA, S.; MADAN, A. Shape memory alloy actuation of non-bonded piezo sensor configuration for bone diagnosis and impedance based analysis. **Biomedical Engineering Letters**, v. 9, n. 4, p. 435–447, 10 nov. 2019.

SU, Y.-F. et al. Instantaneous monitoring the early age properties of cementitious materials using PZT-based electromechanical impedance (EMI) technique. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 340–347, 2019.

SUN, F. P. et al. Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 6, n. 1, p. 134–139, 1995.

TINOCO, H. A. et al. Identification of stiffness variations in supporting substances of a human canine tooth with a bracket-beam-piezoelectric sensor and its electromechanical impedance. **Future Dental Journal**, v. 3, n. 1, p. 15–21, 2017.

TINOCO, H. A. et al. Evaluation of a Piezo-actuated sensor for monitoring elastic variations of its support with impedance-based measurements. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 1, 2019.