

CARACTERIZAÇÃO ELETROTÉRMICA DE UMA FITA (NIT) COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA SUBMETIDA A DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

Iuri Martins da Silva¹, Zoroastro Torres Vilar²

Resumo: Os materiais avançados destacam-se por suas propriedades otimizadas e pela capacidade de tornar processos mais eficientes. Entre eles, as ligas com efeito memória de forma (LEMF) vem ganhando relevância devido a suas propriedades únicas e aplicações diversificadas, especialmente nas áreas de odontologia e engenharia. Este trabalho investiga as propriedades eletrotérmicas da liga NiTi equiatômica submetida a diferentes tratamentos térmicos, visando ampliar o conhecimento científico e tecnológico sobre esse material. Os resultados fornecem dados relevantes para a comunidade acadêmica e para setores industriais que buscam desenvolver estruturas inteligentes, capazes de responder a estímulos externos. , uma lamina fina de NiTi foi submetida a variações de temperatura e tempo de tratamento térmico, seguida de caracterização eletrotérmica para correlacionar esses parâmetros com as temperaturas de transformação de fase. Por meio de um planejamento experimental, foram obtidos modelos que descrevem com precisão as variações nas temperaturas de transformação em função dos tratamentos aplicados. O estudo busca compreender a influência dos parâmetros térmicos (temperatura e tempo) nas propriedades da liga, destacando-se como uma ferramenta crucial para o desenvolvimento de materiais adaptáveis as demandas tecnológicas.

Palavras-chave: Liga com efeito memória de forma; Materiais inteligentes; Tratamento térmico; RET.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de ligas com memória de forma (LMF) tem se tornado cada vez mais frequente em diversos campos de aplicação, abrangendo desde a medicina e ortodontia até as indústrias aeroespacial e automotiva, incluindo seu uso em materiais à prova de bala e amortecimento de construções sujeitas a abalos sísmicos como é tratado em [2]. A capacidade dessas ligas de sofrerem transformações de fase no estado sólido quando submetidas a tensões mecânicas e variações de temperatura permite a recuperação de uma forma pré-fixada ou a geração de força significativa, tornando-as capazes de atuar como conversores de energia termomecânica. A influência do tratamento térmico se estende às propriedades mecânicas e elásticas da liga. O aumento da temperatura e do tempo de tratamento térmico causa redução nas propriedades elásticas e aumento na resistência mecânica das ligas. Isso ocorre porque a presença da microestrutura martensítica e de possíveis precipitações na temperatura do ensaio aumenta a resistência da liga e reduz sua elasticidade. Consequentemente, o platô de transformação austenita-martensita (UPS) dos fios tratados termicamente se reduz conforme se aumenta a temperatura e o tempo de tratamento, o que significa que a tensão necessária para a transformação de fase da liga é menor. A compreensão desses efeitos permite que, a partir dos resultados dos tratamentos, sejam obtidas equações que governam o comportamento da variação das temperaturas de transformação de fase em função dos parâmetros de tempo e temperatura de tratamento. Isso é crucial para determinar qual conjunto de parâmetros deve ser aplicado para conseguir um atuador com uma temperatura de transformação de fase específica, conforme requisitado para sua aplicação como explicado em [2].

A descoberta do fenômeno de memória de forma remonta a 1938, quando Arne Olander foi o primeiro a observar o efeito em ligas metálicas. Ainda em 1938, Greninger e Mooradian descobriram o efeito em bronze. Posteriormente, ligas de Ni-Ti (níquel-titânio), também conhecidas como Nitinol, apresentaram o efeito de memória de forma [10].

As ligas com efeito de memória de forma (LMF), também conhecidas como Shape Memory Alloys (SMA), são segundo [10], materiais metálicos que se enquadram na classe dos materiais inteligentes. Elas se destacam por suas propriedades únicas e sua versatilidade, possuindo a capacidade de atuar termo mecanicamente, gerando força, variando rigidez, amortecimento, além de controlar a forma com a variação da temperatura como é abordado em [4-7].

Essas ligas encontram aplicações em diversas áreas tecnológicas e médicas, oferecendo versatilidade e adaptabilidade como levantado em [10]. Elas são utilizadas em robótica, biomecânica, indústria naval, aeroespacial e automobilística [2]. A utilização de ligas de memória de forma tem sido cada vez mais frequente, abrangendo diversos campos de aplicação [2]. O aprimoramento de projetos de estruturas tem possibilitado a inserção de sistemas integrados com materiais que possuem propriedades peculiares, capazes de perceber e se adaptar a alterações nas condições ambientais e operacionais [10-12].

Neste trabalho, investiga-se como se comportam as amostras em cada fase de uma liga com efeito de memória de forma (LMF). Os tratamentos térmicos aplicados nas ligas com efeito memória de forma podem modificar suas propriedades termomecânicas, como as temperaturas de transformação de fase e energia de ativação, entre outras como abordado em [3].

Ainda de acordo com [3], para entender o estudo dessa liga fazendo papel de material atuador, é necessário analisar as propriedades mecânicas com a variação de temperatura para caracterizar o potencial de ativação desses materiais. As LMFs exibem propriedades únicas e versáteis. Elas têm capacidade de “memorizar” sua forma original após serem deformadas, isso é visível na Figura 1, onde há mudanças estruturais reversíveis em resposta a variações de temperatura e/ou tensão como é estudado em [2-9].

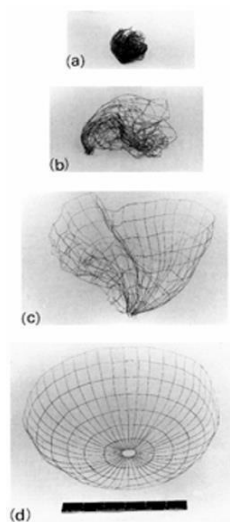


Figura 1-Demonstração do EMF por uma antena espacial feita de fios de NiTi. A antena deformada no estado martensítico em (a) retorna à forma original em (b-d) após aquecimento pelo calor solar (ROTTIERS, W. et al.)

A análise da variação de temperatura (ΔT) para a transformação completa de fase é importante, pois influencia o tempo de resposta do fio como atuador como mostrado em [3]. Ensaio de tração uniaxiais, como os realizados em um dos estudos utilizando máquina universal de ensaios, isso permite obter propriedades mecânicas da liga. É possível variar a temperatura de transformação de ligas de memória de forma a partir de tratamentos térmicos segundo [2]. Durante essas mudanças de fase, propriedades físicas, como resistividade elétrica também se altera. Além disso, nesse estudo, a influência do tempo e da temperatura sobre essas mudanças de fase foi observada, e as temperaturas foram obtidas por meio de testes de Resistência Elétrica à Temperatura (RET).

O presente trabalho busca avaliar e discutir sobre a influencia de tratamento térmico em ligas de NiTi, onde foram combinadas 5 temperaturas e 5 tempos diferentes no tratamento térmico, realizar ensaio de resistência térmica por temperatura (RET), e ao final caracterizar as curvas de temperatura de fase do fio de NiTi para obter as equações que governam com exatidão o comportamento das temperaturas de transformações de fase com o tratamento térmico aplicado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As LMFs podem ser compostas por metais como níquel (Ni) e titânio (Ti), e entre outros metais. A liga NiTi é um caso que se destaca nesse meio, sendo um composto intermetálico equiatômico, apresentando proporção de átomos de níquel e titânio como apresentado em [2].

Sua proeminência se deve à sua boa propriedade de memória de forma, resistência à corrosão, resistência à fadiga, ductilidade, alta capacidade de recuperação e biocompatibilidade. Essas ligas possuem a capacidade de “memorizar”

sua forma original após serem deformadas, graças a mudanças estruturais reversíveis em resposta a variações de temperatura e/ou tensão. Em sua fase martensítica, a liga geralmente se encontra em temperaturas mais baixas e pode ser facilmente deformada como abordado em [10]. Quando aquecida, ela passa pela transformação para a fase austenítica, que ocorre em temperaturas mais elevadas, recuperando as deformações residuais e sua rigidez e geometria original [2]. Dependendo da composição química, é possível encontrar uma fase romboédrica (fase R) como uma fase intermediária, que aparece durante o resfriamento, entre a austenita e a martensita, o que é visto em [10]. A presença dessa fase romboédrica pode representar o surgimento de um pico adicional na curva de análise de resistência elétrica em função da temperatura (RET), intermediando a transformação austenita-martensita. Fatores como ciclagem térmica e envelhecimento podem facilitar o surgimento da transformação romboédrica como explicado em [10]. Para a realização do estudo foram necessárias amostras de fita NiTi com comprimentos entre 40 a 50 mm.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente cortou-se 9 amostras com um comprimento aproximado de 40 mm, suficiente para a montagem de eletrodos para a caracterização da resistência elétrica pela técnica dos quatro pontos. Essas amostras foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos em um forno tipo mufla, mostrado na Figura 3, onde as mesmas foram depositadas com o auxílio de uma amarração para facilitar a retirada no tempo correto, e após esse processo todas elas são resfriadas ao ar livre sem ventilação forçada.

As temperaturas e tempos para o tratamento térmico foram definidas considerando a faixa de temperatura e o tempo de tratamento térmico na Tabela 1, que apresenta as definições para a realização do tratamento térmico. Como é retratado na Tabela 1, ao todo foram necessárias 9 amostras para compreender o conjunto de parâmetros definidos. Foram considerados dois parâmetros variáveis, utilizando-se assim um fator $2^2 + 2$ pontos central.

Tabela 1. Temperaturas e tempos considerados para a caracterização eletrotérmica das amostras. (Autoria própria.).

Amostra	Tempo (min)	Temperatura (°C)
1	10	350
2	10	550
3	30	350
4	30	550
5	5,85786	450
6	34,14214	450
7	20	308,5786
8	20	591,4214
9	20	450

Contando com todas as fases, o estudo parte desde a seleção de temperaturas para a realização do ensaio RET, como mostrado na Figura 2, passando pelo corte da lâmina para a retirada das amostras, e só então elas serão submetidas nas temperaturas definidas, após finalizar o tratamento térmico, a etapa seguinte será o ensaio RET, nesse ensaio é possível entender a relação das fases do material com a sua resistência elétrica.



Figura 2- Fluxograma das etapas do estudo. (Autoria Própria).

3.1 TRATAMENTO TÉRMICO

As amostras foram depositadas no forno mostrado na Figura 3, com o auxílio de uma amarração para facilitar a retirada no tempo correto, e após esse processo todas são resfriadas ao ar livre sem ventilação forçada. Nessa etapa, juntou-se as amostras que eram submetidas a tratamentos térmicos com mesma temperatura, sendo retiradas cada amostra a tempos diferentes. A amarração de fios externos possibilita a retiradas das amostras sem a necessidade de abrir totalmente o forno e consequentemente sem trazer variações indesejadas de temperatura.



Figura 3 - Forno Mufla utilizado no ensaio. (Autoria própria).

Para a realização do tratamento térmico foram necessárias cerca de 3 horas desde o primeiro aquecimento do forno, estabilização da temperatura, e coleta das amostras, onde no decorrer do ensaio foram observadas várias colorações que as amostras absorviam como resultado como é visível na Figura 4.

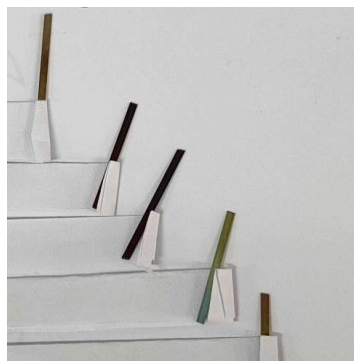


Figura 4 - Amostras após o tratamento térmico. (Autoria própria).

Para prosseguir para o ensaio RET, todas as amostras foram identificadas e foram levadas para o banho com as identificações descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Variações de temperatura e tempo térmico de cada amostra. (Autoria própria).

Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Temperatura(°C)	309	350	350	450	450	550	550	590	450
Tempo(minutos)	20	10	30	6	20	10	30	20	34

3.2 ENSAIO DE RESISTENCIA ELÉTRICA POR TEMPERATURA

O ensaio de resistência elétrica por temperatura (RET) é um procedimento fundamental para investigar como a resistência elétrica de materiais varia em resposta às mudanças térmicas. Essa etapa é feita com o auxílio de uma microsoldadora KERNIT, modelo SMP 3000 GOLD como na Figura 5, utilizando uma técnica de 4 pontos, usando corrente contínua nas amostras e aquisitou-se a variação da diferença de potencial enquanto as amostras foram aquecidas de -10°C ATÉ 120°C.



Figura 5 - Microsoldadora utilizada. (Autoria Própria)

As amostras foram soldadas conforme o esquema da Figura 6 que determina o circuito que envolve todas as 9 amostras de NiTi que foram para o ensaio RET no banho termo regulável.

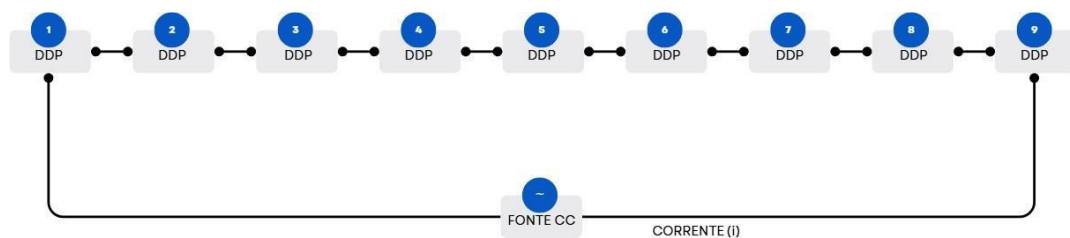


Figura 6 - Circuito elétrico com as amostras. (Autoria própria).

Após o preparo das amostras foi montado o banho para o controle da temperatura das amostras, todas são submersas em uma posição sem contato com as superfícies do fundo do banho. O sistema é alimentado por uma fonte de energia elétrica Keysight E3633A, toda a configuração está mostrada na Figura 7 e 8.



Figura 7 - Configuração do ensaio RET. (Autoria própria).



Figura 8 - Banho termo regulável. (Autoria própria).

A temperatura inicial do ensaio é atingida em 100 °C, a partir daí o resfriamento se inicia, e o módulo de aquisição de dados 34970A, fabricado pela Keysight Technologies, e utilizando software Agilent Benchlink, começa a iniciar

o registro de dados, e assim que o banho atinge -10°C é iniciado o aquecimento até 100°C , e já durante o aquecimento é possível notar a diferença de comportamento entre as curvas de resfriamento e aquecimento, evidenciando as transformações na microestrutura da liga.

Após o fim da coleta de dados, é feita a análise através do método das tangentes que traça retas tangentes nos pontos de inflexão das curvas, o que indica a transformação de fases, quando elas se interceptam, como é descrito pela ASTM F2082-06.

4. RESULTADOS

Com a realização do tratamento térmico e RET, os gráficos gerados mostram uma relação entre resistência e temperatura, e a partir dessa relação é possível a identificação dos pontos de início das fases e como ocorre as transformações de austenita para martensita durante o resfriamento e a transformação da fase martensita para austenita quando as temperaturas se elevarem. Alguns autores, como [10] e [4], relatam da existência de uma terceira fase entre austenita e martensita, que pode ser considerada uma fase de transição, ou fase romboédrica.

Com os gráficos coletados, é possível observar as transformações de fases, sendo austenita para martensita durante o resfriamento, e o inverso, durante o aquecimento, esse fenômeno é evidente nos pontos de inflexão das curvas, durante a variação de temperatura. No gráfico da Figura 9 a seguir é possível ver todas as amostras juntas, e a partir daí foi notada que três curvas descreveram um comportamento diferente, e por isso as análises foram separadas em dois grupos de amostras.

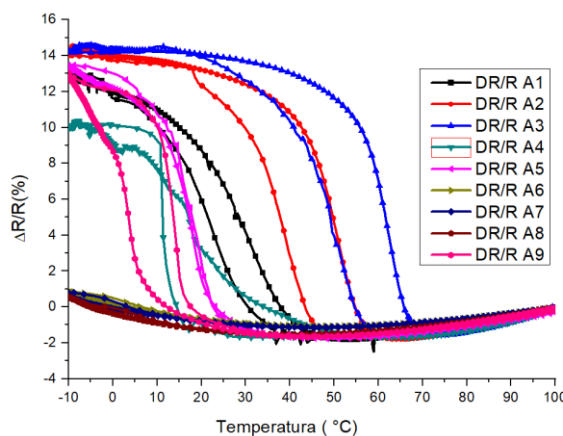


Figura 9 - Resistência elétrica x Temperatura 9 amostras. (Autoria própria).

Durante a interpretação dos resultados, é visível que o desempenho de algumas amostras chama a atenção, como a amostra A3, que foi tratada em baixa temperatura por um tempo mais longo, sendo a curva mais deslocada para a direita, assim como a amostra A2, que foi tratada com a mesma temperatura, por um período menor de tempo.

No gráfico apresentado na Figura 10, apresenta-se o resultado da resistência elétrica em função da temperatura para o conjunto de amostras que tiveram sua transformação martensita final alcançada nos testes. Ressalta-se aqui que o ensaio foi realizado até a temperatura de -10°C devido às limitações do equipamento empregado

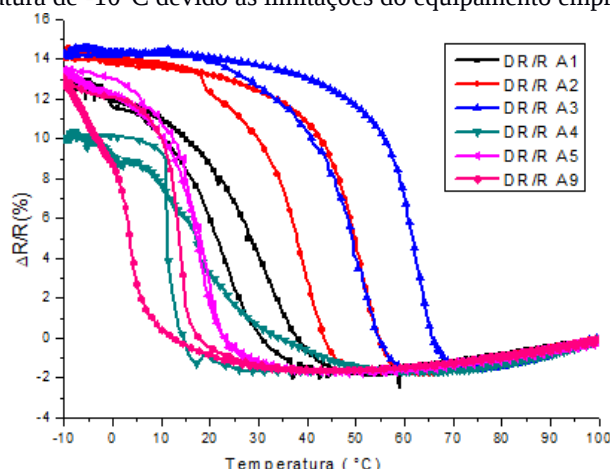


Figura 10 - Resistência elétrica x Temperatura 6 amostras. (Autoria própria).

Houveram comportamentos diferentes para as amostras que foram expostas a temperaturas mais baixas, e quando o tempo de tempera reduz, é visível que a temperatura representada no gráfico RET também reduz.

O tratamento deslocou para baixo a temperatura de transformação martensítica da A8, como visto no gráfico da Figura 11 a seguir:

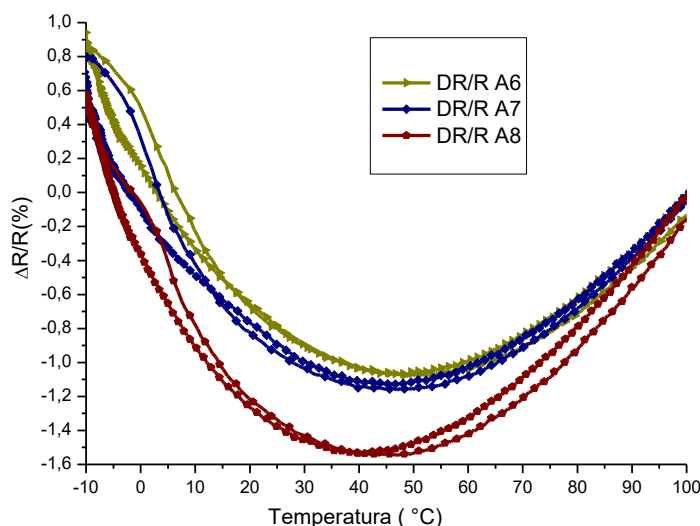


Figura 11 - Resistencia elétrica x Temperatura 3 amostras. (Autoria própria).

O método das tangentes, é um procedimento gráfico para determinar as temperaturas de transformação de fase (austenítica e martensítica) a partir de uma curva de propriedade física versus temperatura. O processo consiste em traçar três linhas retas: duas tangentes que representam as linhas de base das fases totalmente martensítica e totalmente austenítica, e uma terceira tangente na região de maior inclinação da curva, que corresponde à transformação em si. As temperaturas de início e fim da transformação (A_s , A_f , M_s , M_f) são então definidas pelos pontos exatos onde a tangente de transformação intercepta as duas tangentes de base. Na imagem a seguir é possível ver um exemplo de como é usada essa técnica.

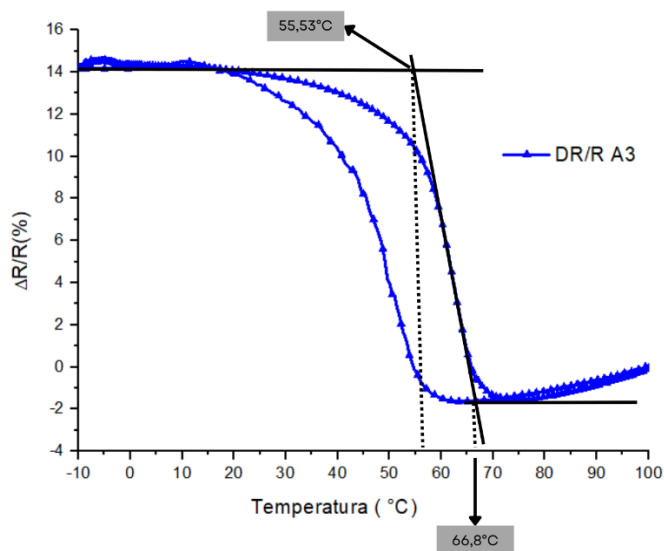


Figura 12 - Demonstração da aplicação do método das tangentes em um exemplo. (Autoria própria).

Através dos métodos das tangentes que é o indicado pela norma ASTM F2082-06, foi possível retirar as temperaturas de transição de fases como na tabela a seguir:

Tabela 3. Temperaturas de transição. (Autoria própria.).

TEMP. (°C)	TEMPO (min)	Mi (°C)	Mf (°C)	Ai (°C)	Af (°C)
309	20	41,78	19,53	14,12	32,98
350	10	56,92	43,17	29,11	46,88
	30	66,8	55,53	33,93	56,31
450	6	38,54	3,47	10,23	14,12
	20	24,79	11,83	11,81	23,7
	34	17,52	10,27	2,23	7,79
550	10	29,11	-	-	32,36
	30	22,27	-	-	26,75
590	20	24,05	-	-	33,92

Como esperado, as amostras A6, A7 e A8 tiveram comportamentos diferentes das outras seis amostras e isso já era esperado pelo seu comportamento na análise gráfica, não possuindo valores de martensita final ou austenita inicial captados no tratamento devido a limitações de equipamento. Na temperatura de tempera de 350°C, a Martensita inicial se comporta de maneira crescente com relação ao tempo de tratamento, o inverso acontece nas amostras de 450°C e 550°C. É perceptível também que das amostras com menores temperaturas de tempera, a exposição da amostra A3 (350°C por 30min) por um longo tempo provocou um maior deslocamento da transformação, chegando ao maior valor da tabela, com 66,8°C. Com base nos dados de temperatura coletados nos testes RET, foi elaborado um planejamento experimental para determinar equações que descrevessem a influência do tratamento térmico na variação das temperaturas de transformação de fase. Tratando da aplicação da liga como material atuador, a fase Romboédrica não é desejada para essa aplicação, o DOE foi aplicado para gerar pontos de análise, considerando o tempo e a temperatura como variáveis, e as identificações na Tabela 4 (Mi, Mf, Ai e Af) correspondem as temperaturas de transição de fase.

Tabela 4 - Planejamento com os resultados do ensaio. (Autoria própria.).

Amostra	Temp (L)	Temp (Q)	Tempo (Min.) (L)	Tempo (Min.) (Q)	1Lby 2L	Mi	Mf	Ai	Af
Temp (L)	1	0,29	0,00	0,34	0,0	0,30	0,12	0,13	-0,00
Temp (Q)	0,29	1	0,00	0,25	0,0	0,3	0,11	0,36	0,28
Tempo (Min.)(L)	0,00	0,00	1	0,0	0,2	-0,16	-0,31	-0,16	-0,34
Tempo (Min.)(Q)	0,34	0,25	0,00	1	0,0	0,83	0,48	0,63	0,60
1L by 2L	0,00	0,00	0,20	0,00	1	-0,54	-0,86	-0,73	-0,72
Mi	0,30	0,35	-0,16	0,83	-0,5	1	0,87	0,95	0,92
Mf	0,12	0,11	-0,31	0,48	-0,8	0,87	1,00	0,95	0,95
Ai	0,13	0,36	-0,16	0,63	-0,73	0,95	0,95	1	0,97
Af	-0,00	0,28	-0,34	0,6	-0,72	0,92	0,95	0,97	1

Após avaliar os dados, elaborou-se um diagrama de Pareto representando as temperaturas Martensíticas e Austeníticas (iniciais e finais), como mostra a Figura 13.

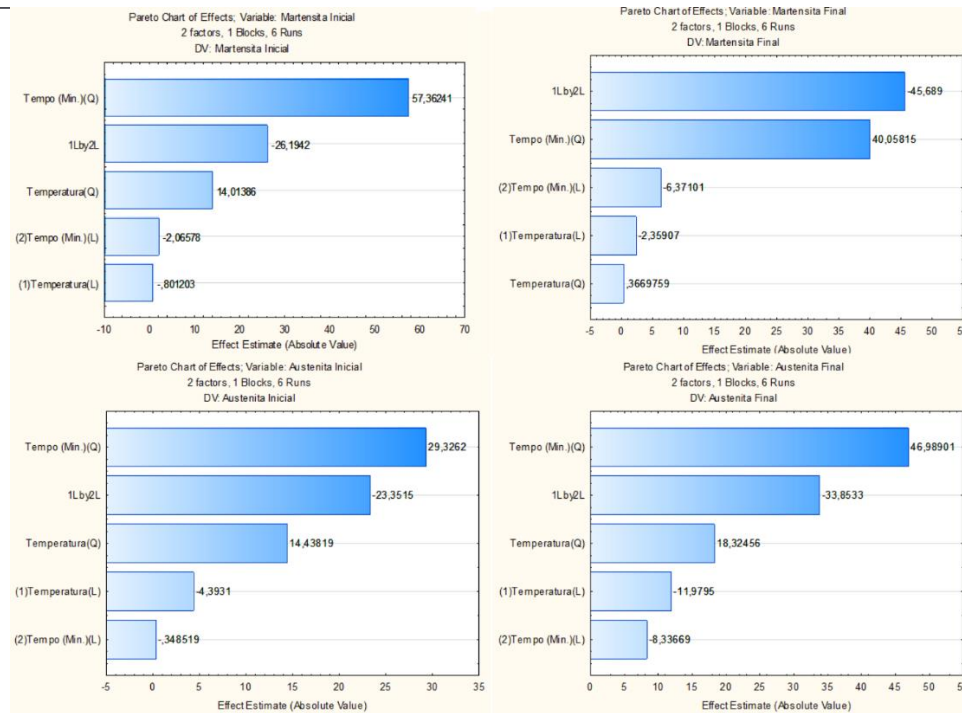


Figura 13 - Diagrama de Pareto. (Autoria própria).

Também foram obtidas as equações que governam o comportamento de transformação de fases para as 4 temperaturas em função dos parâmetros de Tempo e Temperatura como apresentado a seguir:

Equação do modelo Af: $z = 419,04444384552 + 3,559176694659 \cdot x + 0,062879957633526 \cdot x^2 - 1,9047803812983 \cdot y + 0,0023494504236647 \cdot y^2 - 0,0140225 \cdot x \cdot y + 0$.

Equação do modelo para Mi:

$$Z = 531,33954457749 + 3,1249810972922x + 0,048087972567695x^2 - 2,3971082468907y + 0,002868120274323y^2 - 0,01085xy + 0 \quad (1)$$

Equação para Mf:

$$Z = 279,85994880471 + 8,3733795090391x + 0,0012592622740249x^2 - 1,4951666395338y + 0,0020029073772598y^2 - 0,18925xxy + 0 \quad (2)$$

Equação para Ai:

$$Z = 241,25658719233 + 2,3941140693497x + 0,049544023266258x^2 - 1,1480037906037y + 0,0014663097673374y^2 - 0,0096725000000001xy + 0 \quad (3)$$

Equação para Af:

$$Z = 419,04444384552 + 3,559176694659x + 0,062879957633526x^2 - 1,9047803812983y + 0,0023494504236647y^2 - 0,0140225xy + 0 \quad (4)$$

5. CONCLUSÃO

Por meio do presente estudo, foi possível caracterizar amostras de uma liga NiTi submetidas a distintos tratamentos térmicos. O ensaio de RET demonstrou eficiência na determinação das temperaturas de transformação de fase, mediante a aplicação do método das tangentes nas curvas obtidas.

Conforme esperado, observou-se que as temperaturas de transformação de fase variam em função do tempo e da temperatura empregados no tratamento térmico.

De modo geral, os objetivos foram alcançados, evidenciando que foi possível determinar as temperaturas de transformação de fase para diferentes condições das amostras e explorar a aplicabilidade desse material como atuadores em cenários específicos. Esse tipo de liga, inclusive, tem sido empregado em áreas como a medicina e engenharia.

6. REFERÊNCIAS

1. BARBOSA, F. A. A.; NADER, G.; HIGUTI, R. T.; KITANO, C.; SILVA, E. C. N. Um método interferométrico simples para mensurar o fator de calibração e a amplificação do deslocamento em atuadores piezoelétricos flexensionais. *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 6, p. 584–585, nov./dez. 2010.
2. BARBOSA, Marcos Paulo Simões. Controle da temperatura de transformação de fase em uma liga NiTi através do tratamento térmico de betatização. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.
3. BEZERRA, W. J. L.; QUEIROZ, P. R. O.; ALVES, C. C.; VILAR, Z. T.; BEZERRA, D. A. Study of the effect of heat treatment on a NiTi alloy. In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 24., 2017, Curitiba. Anais... Curitiba: ABCM, 2017.
4. BEZERRA, W. J. L.; VILAR, Z. T.; CAVALCANTE, F. J. N.; LOBO, C. J. S. Influência do tratamento térmico nas propriedades termomecânicas de uma liga NiTi passível do efeito de memória de forma. [S. l.: s. n.], 2017.
5. DECKMANN, I. Detecção de falhas em atuadores elétricos através da transformada de Fourier. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
6. GOMES, F. A. P.; OLIVEIRA, A. Sistemas hidráulicos: Da manutenção à usabilidade. *Revista de Engenharia Mecânica*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2023.
7. GRASSI, Estephannie Nobre Dantas. Comportamento termomecânico de minimolas superelásticas de NiTi: influência de tratamentos térmicos. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
8. GUENTHER, R.; PERONDI, E. A. O controle em cascata de sistemas pneumáticos de posicionamento. *Revista Controle & Automação*, v. 15, n. 2, p. 149–161, abr./jun. 2004.
9. OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. Shape memory materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
10. PAIVA, W. G.; VILAR, Z. T. Estudo da influência do tratamento térmico nas propriedades termomecânicas de uma liga com efeito de memória de forma. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, [2017].
11. ROTTIERS, W. et al. Shape Memory Materials and their applications. In: KOROLEV'S READINGS, 2011. Proceedings.
12. VILAR, Z. T. Comportamento eletro-termomecânico de um compósito ativo de CFRP com fios Ni-Ti embebidos. 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
13. VILAR, Zoroastro Torres. Effect of the incorporation of Ni-Ti shape memory alloy wires on the thermo-mechanical behavior of CFRP aeronautic composite. 2012)