CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NO COMPORTAMENTO DE MOLAS HELICOIDAIS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA

André Luís Leandro Argôlo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Rio de Janeiro
Junho / 2023

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NO COMPORTAMENTO DE MOLAS HELICOIDAIS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

André Luís Leandro Argôlo

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor/Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)
(Orientador)

_____

Professor/Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ)

_____

Professor/Dr. Luiz Carlos da Silva Nunes (UFF)

Rio de Janeiro

Junho / 2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A693 Argôlo, André Luís Leandro
Análise da influência do tratamento térmico no comportamento de molas helicoidais de liga com memória de forma / André Luís Leandro Argôlo . — 2023.
114f. + anexo : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 107-114
Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

1. Ligas com memória de forma. 2. Ligas com memória de forma – Propriedades termomecânica. 4. Molas. 5. Tecnologia dos materiais. 6. Elasticidade. I. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Orient.). II. Título.

CDD 620.1632

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todos aqueles que me apoiaram e tiveram fé no resultado que seria atingido. Em especial o maior agradecimento aos meus pais Sheila e Ubiratan que sempre deram apoio em todo o caminho até aqui e que sem os mesmos talvez nada do que foi realizado teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Nenhum grande feito foi realizado sozinho, e por trás de toda grande conquista existem pessoas que representaram apoio aquela conquista e por tal gostaria aqui de agradecer a aqueles me apoiaram no caminho deste estudo de todas as formas. Ofereço minha profunda gratidão a essas pessoas e sem elas essa obra não teria sido possível.

À minha família como um todo que sempre mostraram total apoios e incentivo ao longo de todo o caminho e que sem os mesmos não poderia ter alcançado este resultado.

Ao meu orientador, professor Ricardo Aguiar, com o qual trabalhei desde época de projetos extracurriculares ainda em faculdade, agradeço por toda orientação ao longo desse caminho e pela fé que seria produziríamos um bom resultado e aos colegas Brenno Duarte e Adriel Morgado que forneceram apoio dentro de laboratório para a solução de problemas.

Aos meus amigos do grupo Tabajara que tiveram sempre grande paciência pelas vezes em que estive ausente nos momentos mais apertados deste caminho e serão sempre como uma segunda família.

RESUMO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NO COMPORTAMENTO DE MOLAS HELICOIDAIS DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA

Ligas de memória de forma ou SMA (*Shape Memory Alloy*) são materiais capazes de recuperar deformações causadas por esforços mecânicos através de ciclos termomecânicos apropriados e esta propriedade possibilita o uso destes materiais no desenvolvimento de diversas aplicações, desde sistemas complexos para a atenuação de vibrações à objetos mais cotidianos como a armação de um par de óculos. Este trabalho tem como objetivo estudar a influência dos processos de tratamento térmico durante a fabricação de molas helicoidais de Níquel-Titânio no seu comportamento dinâmico. Os tratamentos foram realizados com temperaturas de 465, 490 e 540°C, com durações de 30 e 60 minutos e utilizando resfriamentos na água, no ar e no forno. Foram realizados carregamentos cíclicos utilizando-se de cargas axiais em frequência de 0,5 Hz a 2,5Hz, com 0,5Hz de incremento, e em temperaturas de 25, 49 e 78ºC. Com estes testes, procura-se identificar como os tratamentos térmicos afetaram o comportamento das molas de SMA. Para a realização dos ensaios foi desenvolvido e construído um aparato experimental. Os testes consistiram em aplicar carregamentos com deslocamento prescrito de 40 mm nas três diferentes temperaturas e em nas cinco diferentes frequências, enquanto se registra a força nas molas. Através dos resultados obtidos, foi possível observar como cada parâmetro da fabricação influenciou no comportamento dinâmico das molas em relação a sua rigidez, bem como na forma e dimensão do laço de histerese e na energia dissipada em cada ciclo. Observou-se que todos os parâmetros de fabricação influenciaram nos limites de transformação e no comportamento dinâmico das molas, porém alguns foram especialmente importantes para uma determinada característica. Portanto, o projeto de molas de SMA deve ser feito a partir de um equilíbrio entre cada parâmetro de fabricação, levando-se em conta a finalidade na qual essa mola será empregada.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Molas de SMA, Pseudo-Elasticidade, Tratamento Térmico, Análise Dinâmica, Molas Helicoidais

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THERMAL TREATMENTS IN DYNAMIC BEHAVIOR OF SHAPE MEMORY ALLOY SPRINGS

Shape memory alloys or SMA are materials capable of recovering deformations caused by mechanical efforts through appropriate thermal cycles and these special properties allow the use of these materials in the development of various applications, from complex systems for the attenuation of vibrations to more everyday objects such as the frame of a pair of glasses. This work aims to study the influence of heat treatment processes during the manufacture of Nickel-Titanium helical springs on their dynamic behavior. The treatments were carried out with temperatures of 465, 490 and 540ºC, with durations of 30 and 60 minutes and using water, air and the oven as cooling methods. Cyclic loads were performed using axial loads at frequencies of 0,5Hz to 2,5Hz with 0,5Hz of increment and with temperatures of 25,49 and 78ºC. With these tests, we try to identify how the heat treatments affected the behavior of SMA springs. To carry that out, an experimental apparatus was developed and built. The tests consisted of applying loads with a prescribed displacement of 40 mm at the three different temperatures and with those five frequencies while recording the force on the springs. Through the results obtained, it was possible to observe how each manufacturing parameter influenced the dynamic behavior of the springs in relation to their stiffness, as well as the shape and size of the hysteresis loop and the energy dissipated in each cycle. It was observed that all manufacturing parameters influenced the transformation limits and the dynamic behavior of the springs, however some were especially important for a certain characteristic. Therefore, the design of SMA springs must be done from a balance between each manufacturing parameter, taking into account the purpose for which this spring will be used.

Keywords: Shape Memory Alloys, SMA Springs, Pseudo-elasticity, Heat Treatment, Dynamic Analysis, Helical Springs

SUMÁRIO

1. Introdução 15
2. Revisão Bibliográfica 17
   2.1. Ligas com memória de forma 17
   2.1.1. Efeito de Memória de forma 18
   2.1.2. Efeito de memória de forma de uma e duas vias (One-Way / Two-Way) 20
   2.1.3. Efeito pseudo-elástico 22
   2.1.4. Transformação por Tensão 22
   2.1.5. Transformação por Temperatura 24
   2.2. NitiNOL 26
   2.2.1. Transformação martensítica multi-estágios 26
   2.2.2. Fase R 29
   2.3. Molas Helicoidais 29
   2.4. Método de Taguchi 33
3. Metodologia 35
   3.1. Molas 35
   3.2. Protótipo de Teste 38
   3.2.1. Sistema de Aquisição 45
   3.2.2. Sistema de Carregamento Mecânico 46
   3.3. Procedimento Experimental 47
4. Resultados Experimentais 50
   4.1. Análise inicial: Resultados obtidos por Duarte (2019) 50
   4.2. Resultados Experimentais 58
   4.3. Análise de dados 81
   4.3.1. Análise dos resultados 91
   4.3.2. Discussão dos Resultados 103

5. Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros 107
Referências Bibliográficas..... 111
Anexo I..... 119
Anexo II..... 165

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Mudança de variante martensítica por tensão (LAGOUDAS, 2008) 19
Figura 2-2: Descrição do ciclo do efeito de Memória de Forma (LAGOUDAS, 2008).....20
Figura 2-3: Carregamento térmico cíclico de um fio de memória de forma com tensão assistida (LAGOUDAS, 2008). 21
Figura 2-4: Ciclo do efeito pseudo-elástico (LAGOUDAS, 2008). 22
Figura 2-5: Demaclação da liga induzida por tensão (LAGOUDAS, 2008). 23
Figura 2-6: Mudança dos Limites de transformação induzidos por tensão (LAGOUDAS, 2008). 24
Figura 2-7: Temperaturas de transformação austenítica e martensítica (LAGOUDAS, 2008). ..25
Figura 2-8: Esquema de transformação martensítica. (a) Transformação direta, (b) Transformação multi-estágios (OTSUKA, 2005; RAVARI et al., 2014). 27
Figura 2-9: Gráfico de comparação da concentração de precipitados na liga em relação a concentração de níquel, tempo e temperatura de tratamento (RAVARI et al., 2014). 28
Figura 2-10: Tensões em molas helicoidais (ENEMARK et al., 2016). 31
Figura 2-11: Distribuição de tensões no fio: (a) tensões de torção, (b) tensões de flexão (ENEMARK et al., 2016).....31
Figura 2-12: Curvas tensão/deformação experimentais para diferentes condições de carregamento (OZBULUT *et al.*, 2010). 32
Figura 2-13: Comparação do teste de ciclos de tensão. A curva com esferas indica os dados dos testes experimentais enquanto as linhas contínuas indicam as predições feitas por modelos computacionais (ENEMARK *et al.*, 2016).....33
Figura 3-1: Resultado do ensaios de DSC do Fio como recebido (DUARTE, 2019) 35
Figura 3-2: Molas Fabricadas para o Estudo (DUARTE, 2019). 36
Figura 3-3: (a) Força máxima para molas com diâmetro de 6 mm (b) Força máxima para molas com diâmetro de 12 mm (DUARTE, 2019). 37
Figura 3-4: Aparato de teste idealizado. – (a): Célula de carga, (b): Suporte das molas, (c): Conjunto biela-manivela, (d): Mancal (e): tensionador, (f): Motor de passo. 38
Figura 3-5: Aparelho de Teste desenvolvido – (a): Célula de carga, (b): Suporte das molas, (c): Conjunto biela-manivela, (d): tensionador, (e): Motor de passo, (f): Drive de controle, (g): Arduino UNO.....39
Figura 3-6: Célula de Carga Lider 20 Kgf. 39

Figura 3-7: (a) Suporte das molas, (b) Hastes em madeira. 40
Figura 3-8: Fonte de potência iCEL Manaus Ps-7000. 41
Figura 3-9: Sistema Biela-Manivela. (a): Haste de ligação com o sistema, (b): Volante para conversão do movimento rotativo em horizontal, (c): Mancal para montagem com o motor de passo. 41
Figura 3-10: Tensionador. 42
Figura 3-11: Motor de passo NEMA23(a), Método de ligação dos fios do motor (b). 43
Figura 3-12: Drive de controle Wotion WD-2404. 44
Figura 3-13: Arduino UNO. 45
Figura 3-14: Diagrama do aparato de teste. 45
Figura 3-15: Spider 8 Hottinger Baldwin Messtechnik de 600Hz. 46
Figura 4-1: Curvas de DSC para resfriamento e aquecimento obtidas por Ravari. (a) Ni-Ti 50.6, (b) Ni-Ti 50.8 e (c) Ni-Ti 51 de % de níquel envelhecida a 773K por 60 minutos após tratamento de solubilização a 1223K por 60 minutos. (RAVARI, 2014). 51
Figura 4-2: (a) Mola aquecida a 465ºC por 30 minutos e resfriada a água, (b) Mola aquecida a 540ºC por 60 minutos e resfriada no forno. (DUARTE, 2019).....52
Figura 4-3: Estabilização dos Ciclos de carregamento em uma mola com diâmetro externo de 6mm, índice de mola 6,6, aquecida a 465ºC por 30 minutos e resfriada em água. 53
Figura 4-4: Comparação entre o ciclo inicial e o ciclo final para mola com diâmetro externo de 6mm, índice de mola 6,6, aquecida a 465ºC por 30 minutos e resfriada em água: (a) ensaio com frequência de 0,5 Hz, (b) ensaio com frequência de 2,5Hz. 54
Figura 4-5: DSC referente a mola tratada a 465º por 30 minutos e resfriada em água. (Duarte, 2019). 55
Figura 4-6: Mola M29-T01- Aquecida a 540 ºC, por 30 minutos e resfriada ao ar (DUARTE, 2019). 58
Figura 4-7: Comparação dos laços de histerese em temperatura ambiente (25ºC) (a): Frequência de 0,5Hz, (b): Frequência de 1,0Hz, (c) Frequência de 1,5Hz, (d) Frequência de 2,0Hz, (e): Frequência de 2,5Hz.....59
Figura 4-8: Comparação da rigidez a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio em temperatura ambiente (25ºC).....61
Figura 4-9: Comparação do laço de histerese por frequência de ensaio para a mola tratada a 465ºC e resfriada a água e ensaiada em temperatura ambiente (25ºC). (a): Tempo de tratamento de 30 minutos, (b): Tempo de tratamento de 60 minutos. 62

Figura 4-10: Comparação da área do laço de histerese em relação da frequência de ensaio para mola a tratada a 465ºC por 30 min (Cinza) e 60 min (Azul) e ensaiada em temperatura ambiente (25ºC). (a): 0,5Hz (b): 1,0Hz (c): 1,5Hz (d): 2,0Hz (e): 2,5Hz. 63
Figura 4-11: Comparação da energia dissipada a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio em temperatura ambiente (25ºC). 65
Figura 4-12: Comparação dos laços de histerese com temperatura de 49ºC (a): Frequência de 0,5Hz, (b): Frequência de 1,0Hz, (c) Frequência de 1,5Hz, (d) Frequência de 2,0Hz, (e): Frequência de 2,5Hz.....66
Figura 4-13: Comparação da rigidez a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio com temperatura de 49ºC. 68
Figura 4-14: Comparação do laço de histerese por frequência de ensaio para a mola tratada a 465ºC e resfriada a água e ensaiada ensaios com temperatura de 49ºC. (a): Tempo de tratamento de 30 minutos, (b): Tempo de tratamento de 60 minutos 69
Figura 4-15: Comparação da área do laço de histerese em relação da frequência de ensaio para mola a tratada a 465ºC por 30 min (Cinza) e 60 min (Azul) e ensaiada com temperatura de 49ºC. (a): 0,5Hz (b): 1,0Hz (c): 1,5Hz (d): 2,0Hz (e): 2,5Hz. 70
Figura 4-16: Comparação da energia dissipada a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio com temperatura de 49ºC. 72
Figura 4-17: Comparação dos laços de histerese com temperatura de 78ºC (a): Frequência de 0,5Hz, (b): Frequência de 1,0Hz, (c) Frequência de 1,5Hz, (d) Frequência de 2,0Hz, (e): Frequência de 2,5Hz.....73
Figura 4-18: Comparação da rigidez a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio com temperatura de 78ºC. 75
Figura 4-19: Comparação do laço de histerese por frequência de ensaio para a mola tratada a 465ºC e resfriada a água e ensaiada com temperatura de 78ºC. (a): Tempo de tratamento de 30 minutos, (b): Tempo de tratamento de 60 minutos 76
Figura 4-20: Comparação da área do laço de histerese em relação da frequência de ensaio para mola a tratada a 465ºC por 30 min (Cinza) e 60 min (Azul) e ensaiada temperatura de 78ºC. (a): 0,5Hz (b): 1,0Hz (c): 1,5Hz (d): 2,0Hz (e): 2,5Hz.....77
Figura 4-21: Comparação da energia dissipada a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água ensaiada com temperatura de 78ºC.....78
Figura 4-22: Área de transformação de fase de acordo com a transformação de fase. Seção (1): Sem transformação de fase; Seção (2): Transformação incompleta, presença de fases intermediárias; Seção (3): Transformação de fase completa.....90
Figura 4-23: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 30 minutos. 91

Figura 4-24: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 30 minutos em função do método de resfriamento utilizado. (a): Molas resfriadas em água, (b): Molas resfriadas ao ar, (c): Molas resfriadas no forno. 93
Figura 4-25: Comparação da energia dissipada pelas molas em cada temperatura de tratamento para o tempo de tratamento de 30 minutos. 94
Figura 4-26: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 60 minutos. 95
Figura 4-27: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 60 minutos em função do método de resfriamento utilizado. (a): Molas resfriadas em água, (b): Molas resfriadas ao ar, (c): Molas resfriadas no forno. 96
Figura 4-28: Comparação da energia dissipada pelas molas em cada temperatura de tratamento para o tempo de tratamento de 60 minutos. 97
Figura 4-29: Comparação da rigidez das molas tratadas por 30 minutos. 99
Figura 4-30: Comparação da rigidez das molas tratadas por 60 minutos. 100
Figura 4-31: Comparação da rigidez das molas tratadas por 30 minutos em cada temperatura de tratamento. 102
Figura 4-32: Comparação da rigidez das molas tratadas por 60 minutos em cada temperatura de tratamento. 102
Figura 4-33: Influência da temperatura de tratamento nos limites de transformação (HEIDARI et al., 2016). 104
Figura 4-34: Ensaios de DSC feitos por Frick et al (2005). Gráficos de DSC do NiTi laminado a quente: (a) como laminado, (b) envelhecido a 300ºC, (c) envelhecido a 350ºC, (d) envelhecido a 400ºC, (e) envelhecido a 450ºC, (f) envelhecido a 550ºC e (g) envelhecido a 600ºC por 1,5h. 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Propriedades de algumas ligas com memória de forma (LAGOUDAS, 2008).....18
Tabela 2-2: Tabela esquemática de uma análise por arranjo de matrizes cruzadas. (MONTGOMERY, 2012) 34
Tabela 3-1: Dados de fabricação das molas de SMA (DUARTE, 2019). 36
Tabela 3-2: Sequência de procedimentos para ensaio 48
Tabela 3-3: Comparação entre os métodos de cálculo da rigidez. 49
Tabela 4-1: Identificação das Molas segundo dados de fabricação. (DUARTE, 2019) 56
Tabela 4-2: Análise dos gráficos de DSC feitos por Duarte (2019).....57
Tabela 4-3: Variação percentual da rigidez da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio em temperatura ambiente (25ºC). 60
Tabela 4-4: Variação percentual da dissipação de energia para ensaio em temperatura ambiente (25ºC).....64
Tabela 4-5: Variação percentual da rigidez das molas para ensaio com temperatura de 49ºC.....67
Tabela 4-6: Variação percentual da dissipação de energia para ensaio com temperatura de 49ºC. 71
Tabela 4-7: Variação percentual da rigidez das molas para ensaio com temperatura de 78ºC.....74
Tabela 4-8: Variação percentual da dissipação de energia para ensaio com temperatura de 78ºC. 78
Tabela 4-9: Valores médios de energia dissipada. 80
Tabela 4-10: Valores médios de constante de mola.....81
Tabela 4-11: atribuição de variáveis e um tipo de ruído 82
Tabela 4-12: Matrizes de Energia dissipada das molas tratadas por 30 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC. 84
Tabela 4-13: Matrizes de Energia dissipada das molas tratadas por 60 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC. 85
Tabela 4-14: Matrizes da rigidez das molas tratadas por 30 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC. 86
Tabela 4-15: Matrizes da rigidez das molas tratadas por 60 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC 87
Tabela 4-16:Códigos de identificação das molas.....88
Tabela 4-17: Indicação do tipo de comportamento apresentado pela molas ensaiadas por Duarte (2019).....89

1. Introdução

Atualmente, a pesquisa no campo de materiais inteligentes tem passado por um crescimento contínuo com a necessidade crescente de novas soluções para diversos problemas na indústria, ou na busca de soluções inovadoras para novas aplicações. Os estudos sobre ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* - SMAs) tem apresentado um crescimento constante e essa tecnologia, devido às suas características únicas, vem sendo aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento.

Como algumas das características principais pode-se citar: A capacidade de atenuar vibrações, aplicabilidade como atuadores mecânicos, geração de energia atuando em conjunto com os materiais piezoelétricos entre outras aplicações que, futuramente, às tornarão uma tecnologia de uso comum na indústria. Aguiar *et al*. (2013), Ozbulut (2010), Ozbulut (2011), Leal (2018), Casciati (2008), Machado (2003), Rodrigue *et al*. (2017), Mândru *et al*. (2010), Jin *et al*. (2016) Ma (2010), Constanza (2020) Ashrafi *et al.* (2020), Butler (2020), Fang (2020), Santos (2019), Osman (2022), Imran (2022) e Lv (2023) apresentam aplicações e estudos em ligas com memória de forma.

Para a correta utilização dessa tecnologia, é necessário compreender as propriedades destas ligas e como os processos de fabricação e o tratamento térmico influenciam nas suas propriedades. Neste trabalho, será realizado um estudo sobre o comportamento dinâmico de molas helicoidais fabricadas com fios de NiTi e tratadas termicamente em diferentes condições, para se entender a influência de cada parâmetro nas suas propriedades termomecânicas. Assim, tornando mais simples controlar estas propriedades através dos processos de fabricação e tratamentos térmicos e, apesar desde estudo estar focado na análise do comportamento de molas, o estudo de outros materiais como fios com memória de forma são igualmente importantes para o entendimento do comportamento dessas ligas. (DIAS, 2005) apresenta estudos sobre fios de liga com memória de forma.

Este trabalho motiva-se pela necessidade do controle mais preciso das características dos efeitos de memória de forma clássico e pseudo-elásticidade presentes em cada mola. Estas características irão definir o tipo de comportamento que a mola irá apresentar em resposta a um estímulo mecânico, sendo importante ressaltar que, a

resposta dinâmica de uma mola de SMA não é semelhante ao comportamento linear de uma mola helicoidal de aço, não sendo possível de se prever facilmente, apenas por análise numérica, o comportamento das molas de SMA. Sendo assim, torna-se importante realizar testes práticos para entender melhor o seu comportamento e como se prever, durante a fase de fabricação, as características finais da mola.

Para a realização dos ensaios, foi desenvolvido e fabricado um dispositivo mecânico simples em que é possível variar a temperatura e frequência do carregamento aplicado na mola de SMA. O objetivo desse trabalho é observar as mudanças no comportamento da mola para diferentes de frequências de carregamento e temperaturas aplicadas na mesma, bem como, a influência da fase R neste comportamento.

No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre SMA, molas helicoidais de SMA e sobre o método de análise utilizado para organizar os dados obtidos. No capítulo 3 será apresentada a metodologia adotada junto a uma descrição do aparato experimento desenvolvido e construído para realização dos testes. No capítulo 4 serão apresentados e discutidos alguns dos resultados obtidos, e no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Para a correta utilização das ligas com memória de forma, é necessário compreender o funcionamento desse tipo de material para só então analisar a influência do processo de fabricação afeta suas características finais. Este capítulo tratará de uma revisão dos conceitos básicos das SMA's necessários para o entendimento do comportamento termomecânico dessas ligas e conceitos relativos a molas helicoidais, ambos necessários para a compreensão dos resultados deste estudo.

2.1. Ligas com memória de forma

As Ligas com Memória de Forma (*Shape Memory Alloys* - SMAs) são ligas metálicas que possuem a capacidade de recuperar deformações voltando à sua forma original quando submetidas a um ciclo térmico apropriado. Entre estas ligas, temos como exemplo: o NiTi ou NitiNOL, o CuZnAl e CuAlNi.

Dentre estes exemplos o NiTi é a liga de uso mais comum, porém, existem trabalhos como o de Nam *et al*. (2019) que apresentaram um estudo sobre a transformação de fase da liga de CuAl9Fe4 através de testes de flexão em uma viga fabricada por diversos tratamentos térmicos. Estas amostras foram testadas e analisadas por microscopia para investigar a microestrutura da liga em três diferentes situações: pós fabricação, pós ensaio de flexão com apenas a recuperação elástica da liga e pós atuação do efeito de memória de forma com uma recuperação de deformação maior.

Temos ainda como exemplo o trabalho de Kim *et al*. (2006) onde apresentaram um estudo para caracterizar amostras fabricadas de uma liga de Ti-Nb, com 15 a 35% Nb com o objetivo de compreender o comportamento da liga frente as diferentes porcentagens de Nb.

A Tabela 2-1 apresenta propriedades das principais ligas de SMA exemplificadas onde: E_A o módulo de elasticidade da liga quando em fase austenítica e E_M o módulo

elasticidade quando em fase martensítica, H é a máximo recuperação atingida pela liga, dado importante para aplicações em atuadores, e por fim ρ é a densidade da liga.

As ligas de NiTi apresentam geralmente recuperações da ordem de 8% enquanto as demais ligas baseadas em Cobre estão na faixa de 4 a 5% (LAGOUDAS, 2008). Sendo assim, é mais comum aplicações com ligas de NiTi pela performance superior, mas não descartando o uso das ligas de cobre uma vez que estas possuem um menor custo.

Tabela 2-1: Propriedades de algumas ligas com memória de forma (LAGOUDAS, 2008)

Propriedades	NiTi	NiTiCu	NiTiPd	CuAlNi
E_A(GPa)	70	50	15	90
E_M(GPa)	30	25	25	80
H (%)	6	5	3	4
ρ (kg/m³)	6500	6500	8200	7500

2.1.1. Efeito de Memória de forma

O efeito de memória de forma acontece com a reorientação da estrutura cristalina das ligas quando submetidas a um ciclo de carregamento mecânico ou térmico. As SMA's, dentro dos ciclos termomecânicos, apresentam duas fases básicas: austenítica e martensítica que possuem características distintas. Dentro da fase martensítica pode-se citar a existência de duas variantes principais chamadas de martensita maclada, onde as lamelas acomodam-se formando um cristal compacto e que ocorre após um ciclo térmico para recuperação da deformação imposta por um ciclo mecânico e a martensita não-maclada ou demaclada que aparece após um ciclo mecânico retendo ainda as deformações residuais no material.

Estas transformações ocorrem quando a liga é submetida a ciclos termomecânicos que superam os limites de transformação de fase por temperatura onde são chamados de M_s e M_f, para o início e final da transformação martensítica; A_s e A_f para o início e final

da transformação austenítica e σ_s e σ_f para o início e final da transformação por tensão. (LAGOUDAS, 2008)

A transformação entre as variantes martensíticas maclada e demaclada é alcançada pela aplicação de um carregamento acima da tensão σ_f, onde as lamelas de martensita são reorientadas no sentido da variante mais favorável e resultando uma mudança de fase e formando a martensita demaclada (figura 2-1. (LAGOUDAS, 2008)).

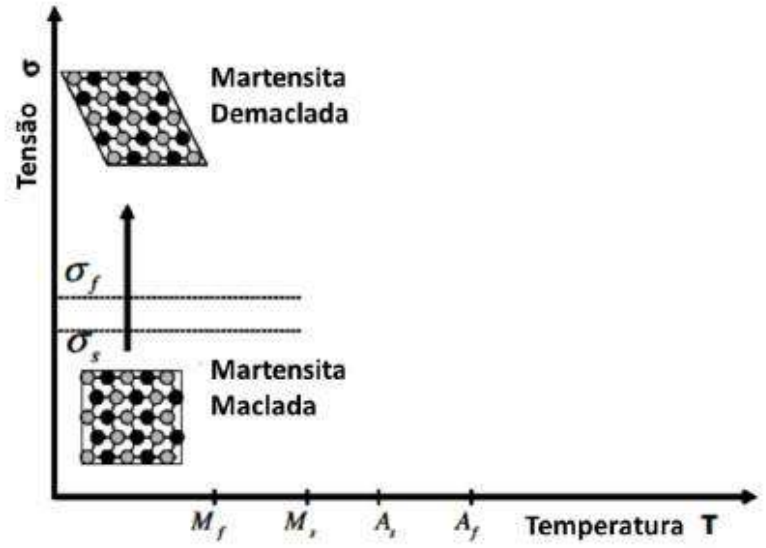


Figura 2-1: Mudança de variante martensítica por tensão (LAGOUDAS, 2008)

Após o término do carregamento mecânico, pela realização de um ciclo térmico que ultrapasse a temperatura de final da transformação austenítica, A_f, essas lamelas desaparecem e o material retorna a sua forma original e a liga para estrutura austenítica. Por fim, ao resfriar o material a temperaturas abaixo de M_s e com as tensões abaixo σ_s observa-se novamente a organização das lamelas em maclas e o material retorna a estrutura de martensíta maclada com a deformação previamente imposta totalmente recuperada. A figura 2-2 (LAGOUDAS, 2008) mostra o ciclo de transformação desde o ciclo mecânico inicial até o ciclo térmico para recuperação e passando pelas três estruturas mencionadas.

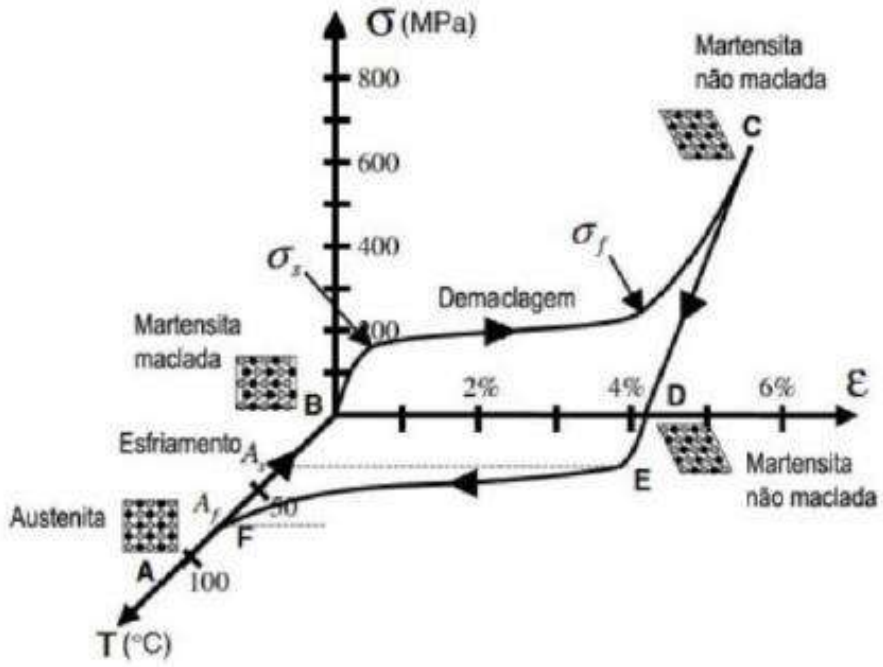


Figura 2-2: Descrição do ciclo do efeito de Memória de Forma (LAGOUDAS, 2008).

2.1.2. Efeito de memória de forma de uma e duas vias (One-Way / Two-Way)

O efeito de memória de forma convencional ou One-Way (OWSMA) refere-se ao efeito de recuperação de deformação da liga onde ela é reorientada por tensão entre as variantes martensita maclada e demaclada, em temperaturas abaixo de M_f, que desenvolve tensões residuais por ser uma variante estável. Após ser submetida a um ciclo térmico de aquecimento acima da temperatura final da transformação austenítica, A_f, essas tensões são aliviadas e a liga recupera a deformação imposta no carregamento mecânico (LAGOUDAS, 2008).

Por outro lado, existe um método de treinamento da SMA para que ela lembre de sua forma em ambos os limites de temperatura permitindo trabalho apenas com ciclos térmicos e gerando o efeito de memória de forma de duas vias ou *Two-Way shame memory effect* (TWSME).

Este treinamento é realizado pela aplicação de repetidos ciclos termomecânicos em uma mesma amostra até que o laço de histerese se estabilize como exemplificado na figura 2-3. Ao longo dos ciclos, uma pequena quantidade de deformação permanente é observada e se reduz gradativamente até um ponto de saturação onde, a partir daquele ponto, o ciclo se torna estável. (LAGOUDAS ,2008)

O efeito de TWSME é um resultado de defeitos introduzidos na liga ao longo dos ciclos de treinamento. Estes defeitos criam um estado de tensão interna, facilitando a formação de variantes martensíticas preferenciais quando o material é resfriado e livre de tensões (LAGOUDAS, 2008). Com esse treinamento, o material passa a ser capaz de transitar entre duas formas apenas com a aplicação de um ciclo térmico.

Os trabalhos de Sofla *et al*. (2008), Yoo (2011) e Hayrattin *et al*. (2018) apresentam diferentes estudos sobre o TWSME.

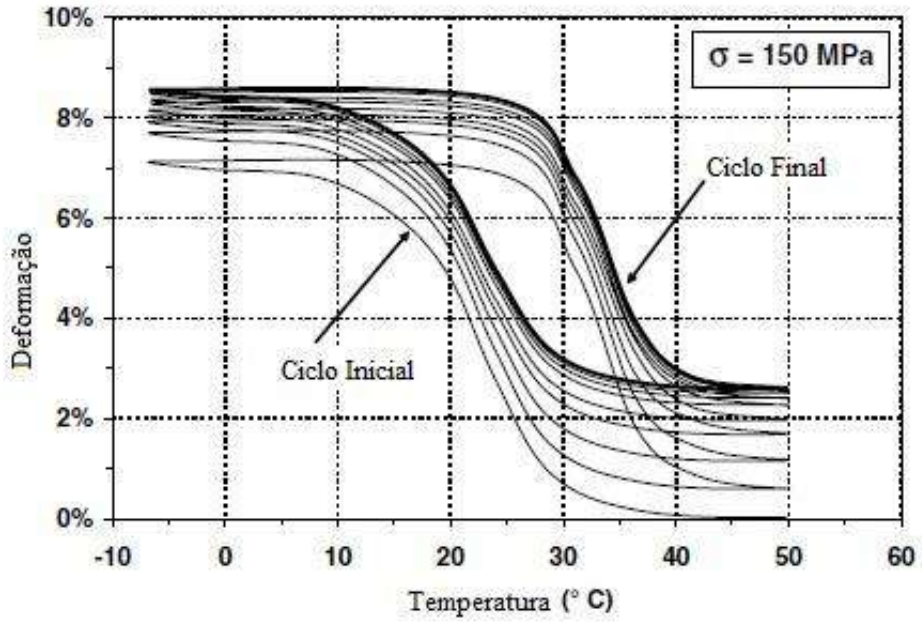


Figura 2-3: Carregamento térmico cíclico de um fio de memória de forma com tensão assistida (LAGOUDAS, 2008).

2.1.3. Efeito pseudo-elástico

O efeito pseudo-elástico acontece em ligas que estão em temperaturas acima do final da transformação austenítica A_f e são submetidas a um carregamento mecânico que promova a mudança da fase austenítica para fase martensita não maclada. Por ser uma liga que já está acima da temperatura de transformação de fase, o descarregamento fará com que ela retorne para a fase austenítica e não para a fase de martensita maclada, recuperando no processo toda a deformação causada pelo carregamento como pode ser visto na figura 2-4.

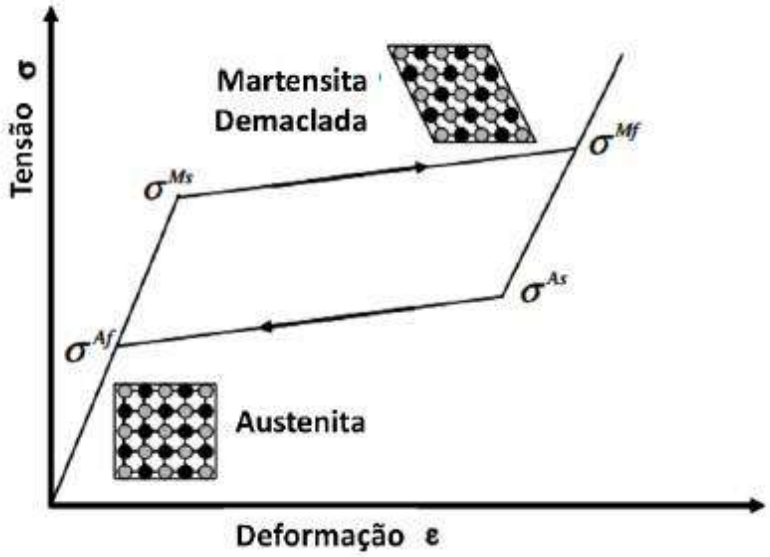


Figura 2-4: Ciclo do efeito pseudo-elástico (LAGOUDAS, 2008).

2.1.4. Transformação por Tensão

Os carregamentos mecânicos atuam como agente de mudança de estrutura cristalina de martensíta maclada para não maclada quando em baixas temperaturas, isto é, quando abaixo da temperatura de início de transformação de fase A_s. Para estas

mudanças são definidas as tensões críticas de início de final de transformação, σ_s e σ_f respectivamente, sendo que esta é uma mudança de única via. Este efeito pode ser observado na figura 2-5.

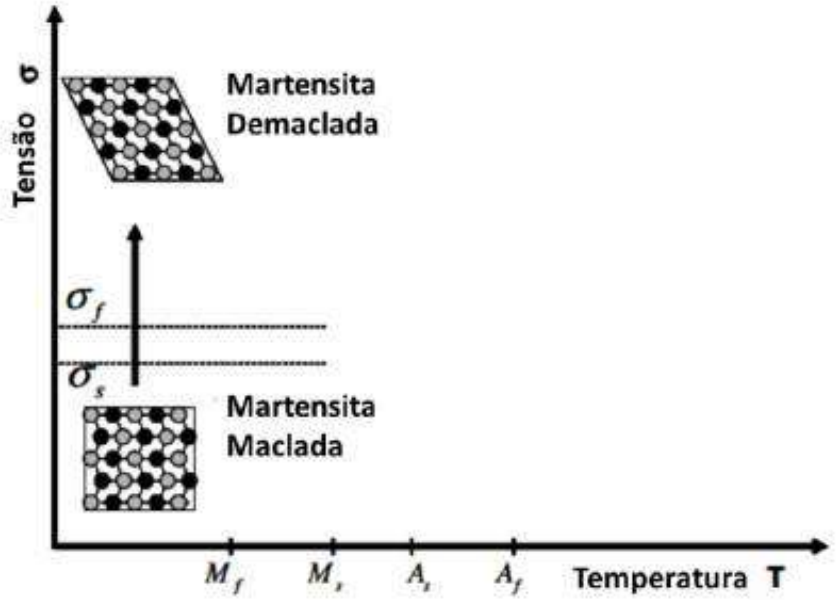


Figura 2-5: Demaclação da liga induzida por tensão (LAGOUDAS, 2008).

Quando um carregamento é realizado em temperaturas acima do final da transformação de fase A_f é observado o efeito chamado de pseudo-elasticidade onde a liga passa da fase austenítica, relacionada a altas temperaturas, acima de A_f, e muda de fase para martensita demaclada. Esta fase se mantém enquanto o carregamento mecânico se mantiver, e retornando a fase austenítica quando o carregamento mecânico é encerrado recuperando toda a deformação imposta pelo carregamento prévio.

Esta mudança entre fases é provocada pela variação dos limites de transformação que é observado ao impor um carregamento mecânico na liga. Este efeito pode ser observado na figura 2-6 (LAGOUDAS, 2008). A transformação de fase por ciclo térmico dentro destas condições é chamada de transformação de fase com tensão assistida.

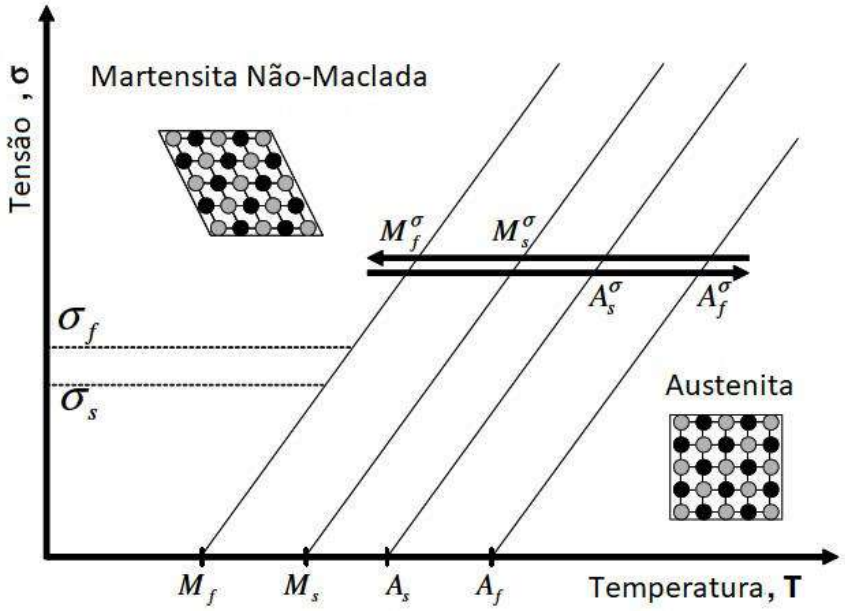


Figura 2-6: Mudança dos Limites de transformação induzidos por tensão (LAGOUDAS, 2008).

2.1.5. Transformação por Temperatura

Os ciclos térmicos atuam na mudança dos SMA's entre suas fases martensítica e austenítica e são responsáveis pela recuperação da deformação através dessa mudança de fase. Os ciclos térmicos também induzem o retorno da liga a fase de martensita maclada partindo da fase austenítica após o resfriamento.

A aplicação de carregamentos térmicos é utilizada principalmente para projetos de atuadores, que trabalham sobre carregamentos mecânicos contínuos e seu movimento é realizado pela variação de temperatura entre os limites de início e término da transformação austenítica, A_s e A_f respectivamente e as temperaturas de início e término da transformação martensítica M_s e M_f respectivamente, como se pode observar na figura 2-7 (LAGOUDAS, 2008).

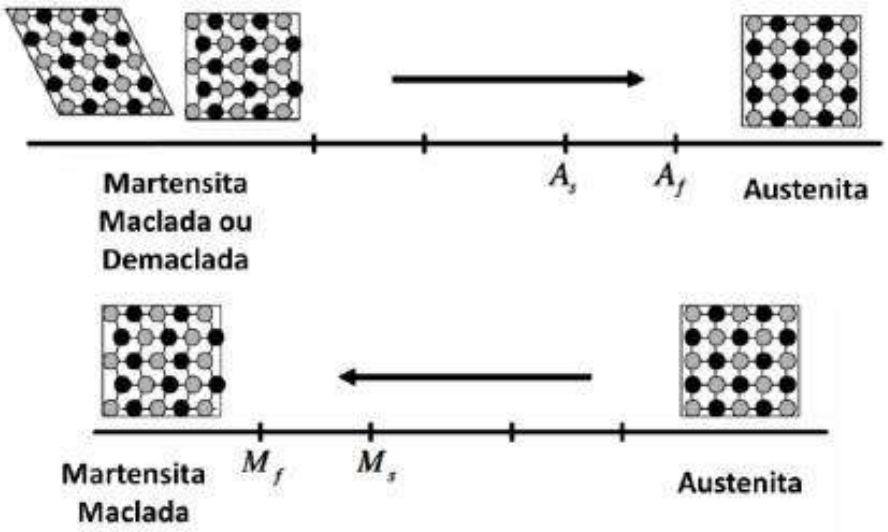


Figura 2-7: Temperaturas de transformação austenítica e martensítica (LAGOUDAS, 2008).

Miyazaki *et al*. (1986), estudaram a influência dos ciclos térmicos nas temperaturas de transformação de fase e observou que as temperaturas de transformação martensítica mudam com o número de ciclos, criando assim a possibilidade de aumentar o tempo entre o início e o final da transformação.

2.2. NitiNOL

As ligas de NiTi são as mais importantes das ligas com memória de forma para usos práticos por suas excelentes propriedades termomecânicas entre outras vantagens como a boa resistência mecânica, ductibilidade, resistência a corrosão, resistência a abrasão e excelente biocompatibilidade.

Estas ligas se tornaram populares rapidamente após sua descoberta no U.S. Naval Ordnance Laboratory (NOL), ao qual deu origem ao nome de NiTiNOL (LAGOUDAS, 2008). Nas ligas NiTi existem muitos sistemas de transformação de fase que incluem transformações martensíticas, difusionais e não difusionais (OTSUKA, 2005) e, todas estas etapas de transformação têm influência nas propriedades finais da liga. Sendo assim, entender o funcionamento do sistema de transformação de ligas NiTi mostrou-se bastante complexo e um diagrama de fase confiável foi descrito apenas em 1980, anos após sua descoberta em 1963 (LAGOUDAS, 2008).

2.2.1. Transformação martensítica multi-estágios

Vários estudos indicam que as ligas de NiTi podem ser trabalhadas para aumentar a performance do efeito da liga pela introdução de precipitados Ti_3Ni_4 que, por sua vez, causam uma redução da concentração de níquel na matriz, facilitando o controle das temperaturas que transformação as quais são muito sensíveis a esta concentração de níquel (KIM *et al*., 2005; KARACA *et al*., 2013; WANG *et al.*, 2016).

Porém, a introdução destes precipitados modifica a energia necessária para a transformação martensítica completa, e por consequência altera a estabilidade das fases, modificando as temperaturas de transição e causando distorções na transformação martensítica. Estes precipitados são responsáveis pelo aparecimento de várias fases intermediárias, como a fase R (OTSUKA, 2005), durante da transformação. Dando origem as chamadas transformações martensíticas multi-estágios ou MMT (*multistage martensic transformation*).

Pela teoria de nucleação de transformação da fase sólida, os contornos de grão favorecem a precipitação, levando a uma grande concentração de precipitados nos contornos em relação ao centro (FAN *et al*., 2004; MICHUTTA *et al*., 2006), levando a uma grande heterogeneidade microestrutural que podem levar a comportamentos diferentes de transformação no centro e no contorno do grão (KHALIL-ALLAFI *et al*., 2002; RAVARI *et al*., 2014).

A figura 2-8(a) mostra um esquema simples do que seria uma transformação direta normal em ligas pseudo-elásticas onde se observa a austenita normalmente transformando-se diretamente para uma fase martensítica sobre a presença de um esforço mecânico ou passando pela fase R antes de se transformar para a fase martensítica.

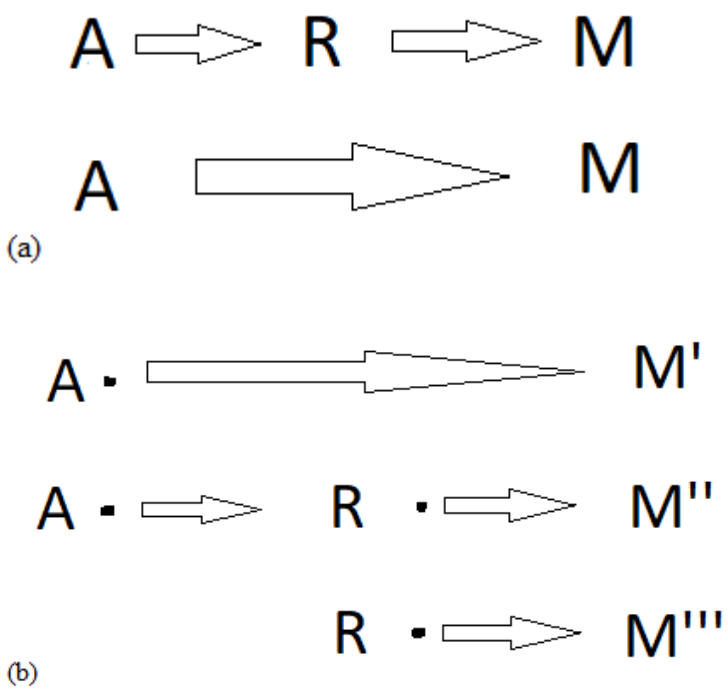


Figura 2-8: Esquema de transformação martensítica. (a) Transformação direta, (b) Transformação multi-estágios (OTSUKA, 2005; RAVARI *et al*., 2014).

Por outro lado, a figura 2-8(b) exemplifica uma transformação multi-estágios onde, por influência das diferentes concentrações de precipitados na austenita provocam

diferentes transformações em uma mesma liga, mudando o tipo de variante desde o centro do grão até a região do contorno.

Essas alterações na sequência de transformação são difíceis de serem caracterizadas e tem grande influência no comportamento mecânico das ligas. Ravari *et al.* (2014) estudaram a influência de diferentes porcentagens de níquel na fase da transformação martensítica de ligas NiTi, observando as diferentes concentrações de precipitados que ocorrem em cada liga e como estes precipitados influenciam na transformação com diferentes MMT's, fazendo com que as propriedades termomecânicas sejam totalmente distintas para cada caso.

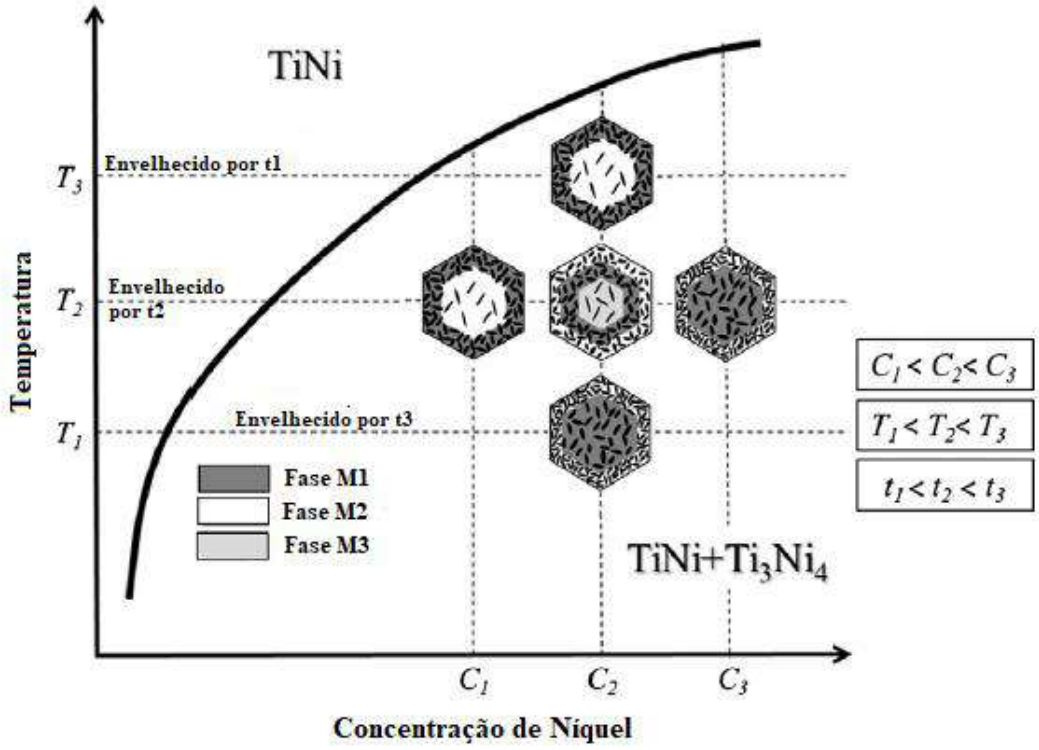


Figura 2-9: Gráfico de comparação da concentração de precipitados na liga em relação a concentração de níquel, tempo e temperatura de tratamento (RAVARI *et al.*, 2014).

A figura 2-9 mostra um gráfico desenvolvido por Ravari *et al.* (2014) de um ensaio utilizando molas com concentrações de níquel de 50,6% para C1, 50,8% para C2 e 50% para C3 e temperaturas de 475, 500 e 525ºC. É possível observar que para diferentes

concentrações de Ni em uma mesma temperatura ou em uma mesma concentração e diferentes temperaturas, a concentração de precipitados apresentou uma variação, o que leva a fases martensíticas diferentes, criando-se assim uma estrutura heterogênica que vai influenciar no comportamento mecânico da liga.

2.2.2. Fase R

A introdução de precipitados Ti_3Ni_4 em ligas que passaram por um processo de envelhecimento pode produzir melhorias no efeito de memória de forma, melhor controle das temperaturas de transformação e o aparecimento de fases de transformação intermediárias, entre elas a fase R. A fase R apresenta uma estrutura triagonal complexa que ocorre entre as transformações austenítica ou martensítica e é caracterizada pelo grande aumento da resistividade da liga e a grande redução na histerese por temperatura (OTSUKA, 2005). Essas características tornam a Fase R completamente indesejável em determinadas aplicações práticas onde são necessários grandes valores de dissipação de energia.

Pela introdução dos precipitados na liga, a modificação das temperaturas de transformação faz com que, em certas situações, a fase R seja estável em temperaturas indesejadas. Dessa forma, é muito importante o controle do aparecimento desta fase na composição ligas, de forma a evitar seu aparecimento em temperaturas de trabalho (LIU *et al.*, 1999; BENAFAN *et al*., 2014; STRNADEL *et al*., 1994).

2.3. Molas Helicoidais

Em geral, as molas são classificadas em relação ao formato como: molas de fio, molas planas ou molas de formato especial, e dentro dessas divisões existem outras variações. Dentro das molas de fio existem as molas helicoidais de fio redondo e fio quadrado, que são feitas para resistir e defletir sob cargas de tração, compressão ou torção.

As molas helicoidais de fio redondo será o tipo abordado neste trabalho (NISBETT *et al*., 2011).

Molas de SMA (“Shape Memory Alloy”) constituem uma alternativa para aplicações onde são necessários grandes deslocamentos, sendo de especial relevância para aplicações dinâmicas. Para molas helicoidais é importante ter atenção com o modo de carregamento sofrido por elas, pois isto influenciará na tensão interna no fio da mola e consequentemente como irá ocorrer a transformação da liga.

Na fabricação de molas é importante ter atenção com as dimensões da mola e do fio pois a relação destes terá grande influência na rigidez da mola. O índice da mola é uma relação calculada pela equação 2-1 apresentada abaixo.

$$C = \frac{D}{d} \qquad (2-1)$$

Onde *D* é o diâmetro médio da mola e *d* é o diâmetro do fio da mola. Quanto menor o valor do índice *C*, maior a rigidez da mola (NISBETT *et al*., 2011).

Quando molas helicoidais são submetidas a forças axiais, os fios da mola ficam submetidos a esforços de torção e flexão. Enemark *et al*. (2016) analisaram os esforços na mola quando é aplicado um carregamento axial na mola. A figura 2-10 mostra em destaque a relação das dimensões da mola quando relaxada e após carregada com uma força F e são destacados os momentos de torção e de flexão no fio da mola. Estes momentos resultam em tensões internas que variam ao longo do diâmetro do fio partindo da linha neutra até a extremidade do fio, como pode ser observado na figura 2-11.

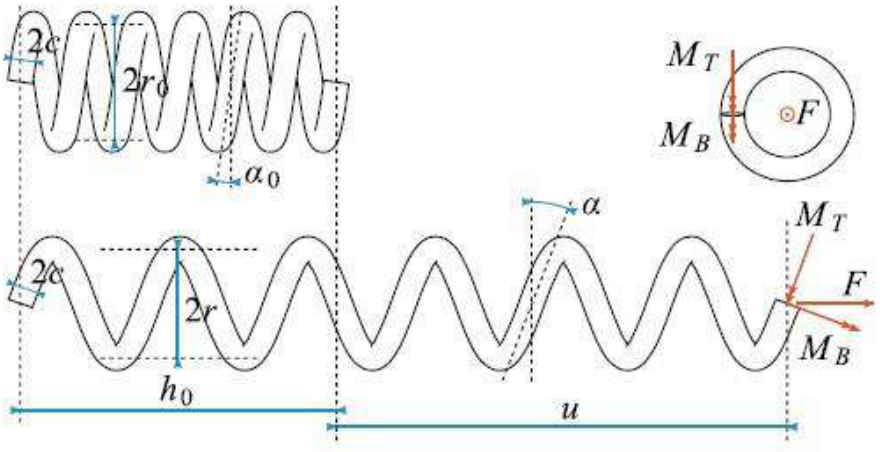


Figura 2-10: Tensões em molas helicoidais (ENEMARK *et al.*, 2016).

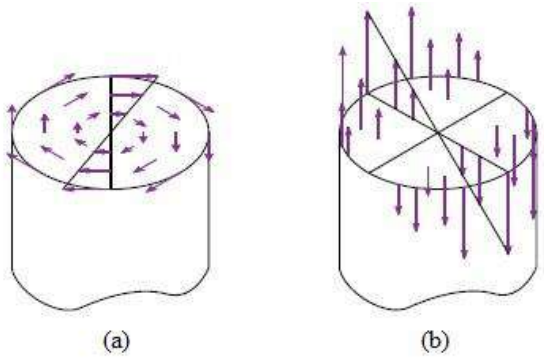


Figura 2-11: Distribuição de tensões no fio: (a) tensões de torção, (b) tensões de flexão (ENEMARK *et al.*, 2016).

Pela natureza do carregamento de torção, a linha neutra do fio apresentará uma tensão nula, sendo assim, para a mudança de fase por tensão, as molas poderão apresentar fases diferentes do centro do fio até a sua extremidade. Heidari *et al.* (2016) apresentaram um estudo sobre a fabricação de molas com fio de Ni-Ti. Neste, foi feito uma análise usando dois fios diferentes, um com comportamento de memória de forma clássico e outro com comportamento pseudoelástico. Dessa forma, foram fabricadas molas com diferentes passos e temperaturas de tratamento térmico, buscando investigar o efeito destes parâmetros no comportamento termomecânico das molas fabricadas. Outros

estudos sobre o projeto de molas e modelagem de molas podem ser encontrados nos trabalhos de Huang *et al.* (2018), Hashemi *et al*. (2019) e Baniasadi *et al.* (2020).

Em 2010, Ozbulut *et al*., publicaram um trabalho sobre uma aplicação com fios de SMA na atenuação de vibrações em estruturas de pontes. Os resultados encontrados indicam uma sensibilidade no comportamento dessas ligas em diferentes temperaturas e frequências de carregamento. A figura 2-12 mostra uma comparação dos resultados obtidos na avaliação do sistema criado.

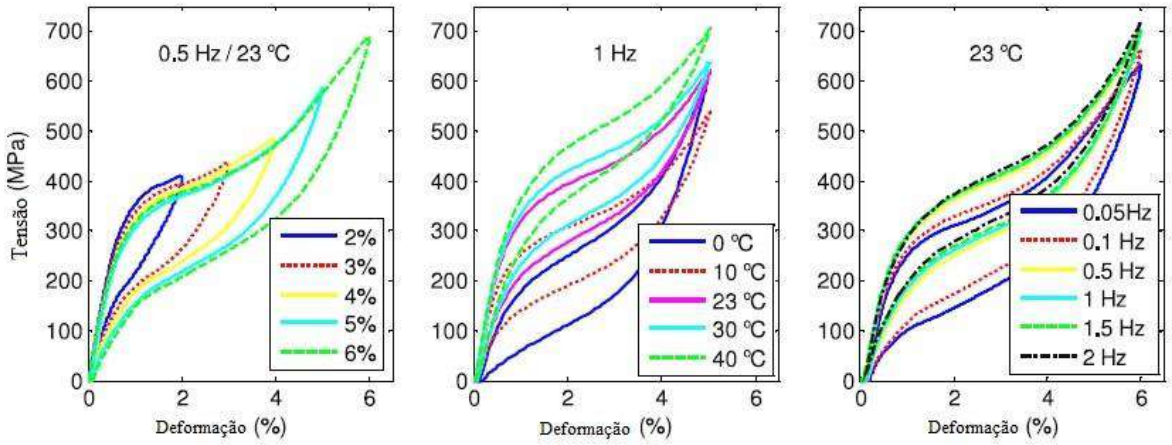


Figura 2-12: Curvas tensão/deformação experimentais para diferentes condições de carregamento (OZBULUT *et al.*, 2010).

Em 2016, Enemark *et al*., observaram a mudança do comportamento de molas pseudo-elásticas sobre diferentes valores de temperaturas e frequência de carregamento nas molas. A figura 2-13 apresenta uma amostra dos resultados obtidos por eles.

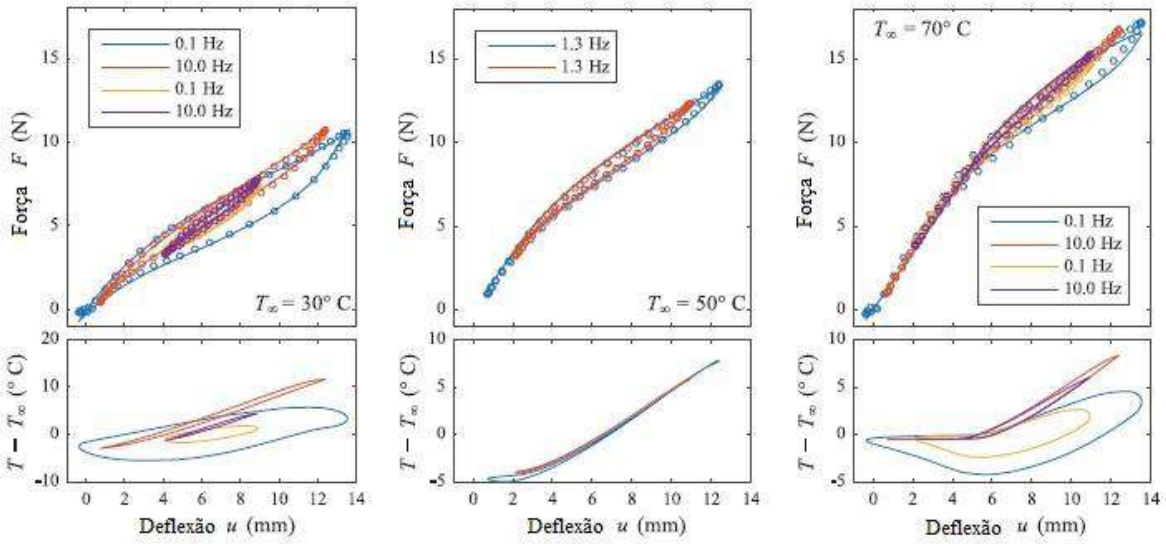


Figura 2-13: Comparação do teste de ciclos de tensão. A curva com esferas indica os dados dos testes experimentais enquanto as linhas contínuas indicam as predições feitas por modelos computacionais (ENEMARK *et al*., 2016).

2.4. Método de Taguchi

Em um processo de controle de fabricação, o RPD ou *Robust Parameter design* é uma prática de projeto utilizada para analisar e escolher parâmetros com o foco em: assegurar determinadas respostas do produto produzido e que a variabilidade das respostas seja a menor possível. O estudo dos processos de fabricação em um projeto é chamado *Process Robustness Study*. Genichi Taguchi foi um engenheiro japonês que propôs método de análise para o RPD baseado em experimentos planejados e novos métodos para a análise resultados (MONTGOMERY, 2012). O método proposto por Genichi introduz o conceito de variáveis de ruído ou variáveis incontroláveis como variáveis que causam grandes alterações na resposta de um sistema.

O método original de Taguchi para a resolução de problemas de RPD se baseia em um projeto estatístico em torno das variáveis controláveis de um processo e outro em torno de um projeto com a variáveis de ruído. Estes são estão “cruzados” combinando todos os parâmetros escolhidos para o processo com as variáveis de ruído. Esse processo

é chamado **arranjo de matrizes cruzadas**. A figura 2-14 ilustra um exemplo de uma matriz.

Tabela 2-2: Tabela esquemática de uma análise por arranjo de matrizes cruzadas. (MONTGOMERY, 2012)

A	*B*	*C*	*D*	$E = -$	$E = +$	$\bar{y}$	s^2
−	−	−	−	7.78, 7.78, 7.81	7.50, 7.25, 7.12	7.54	0.090
+	−	−	+	8.15, 8.18, 7.88	7.88, 7.88, 7.44	7.90	0.071
−	+	−	+	7.50, 7.56, 7.50	7.50, 7.56, 7.50	7.52	0.001
+	+	−	−	7.59, 7.56, 7.75	7.63, 7.75, 7.56	7.64	0.008
−	−	+	+	7.54, 8.00, 7.88	7.32, 7.44, 7.44	7.60	0.074
+	−	+	−	7.69, 8.09, 8.06	7.56, 7.69, 7.62	7.79	0.053
−	+	+	−	7.56, 7.52, 7.44	7.18, 7.18, 7.25	7.36	0.030
+	+	+	+	7.56, 7.81, 7.69	7.81, 7.50, 7.59	7.66	0.017

Pode-se observar no exemplo que são determinadas quatro variáveis: *A, B, C* e *D* consideradas variáveis de projeto, enquanto a variável *E* é uma variável de ruído. É feita a combinação de todas as possíveis variáveis de projeto e estas testadas em relação a variável de ruído e se tem uma média dos resultados e por sua vez uma variância resultante. Este método será utilizado neste trabalho para facilitar a análise das variáveis envolvidas nos testes realizados.

3. Metodologia

Neste trabalho foi utilizado carregamento cíclico com deslocamento prescrito em molas de SMA pré-tensionadas com um mesmo valor inicial em todos os ensaios, variando a frequência do carregamento e a temperatura aplicada na mola durante os ensaios. Pela aplicação destes ciclos de carregamento e temperatura espera-se entender como o comportamento dinâmico de cada mola foi influenciado pelo processo de tratamento térmico utilizado durante a sua fabricação. Para a realização destes ensaios foi projetado e construído um aparato experimental que será descrito neste capítulo.

3.1. Molas

As molas utilizadas neste estudo foram as fabricadas por Duarte (2019), estas foram produzidas utilizando um fio de NiTi de 0,9 mm de diâmetro da empresa Sandinox. Para se avaliar as temperaturas de transformação de fase do fio antes de qualquer tratamento no fio utilizou-se um equipamento de Calorimetria de varredura diferencial (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*), da marca Netzsch. Este ensaio também informou sobre a ocorrência ou não da fase R. A figura 3-1 mostra o resultado do DSC do fio de SMA como recebido do fabricante.

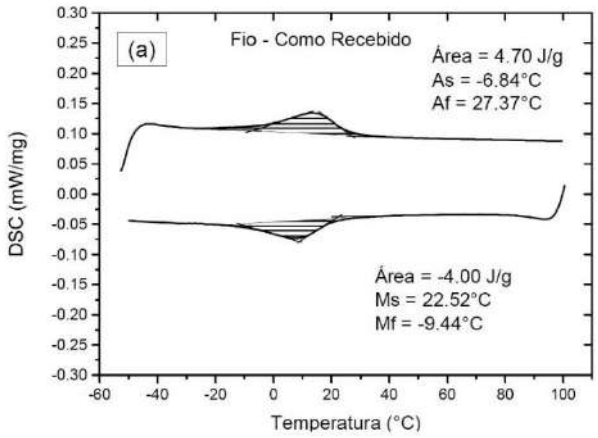


Figura 3-1: Resultado do ensaios de DSC do Fio como recebido (DUARTE, 2019)

As molas utilizadas passaram por um processo de tratamento térmico de envelhecimento, sendo utilizadas diferentes temperaturas de tratamento e métodos de resfriamento com durações diferentes durante a sua fabricação. Os detalhes da seleção dos parâmetros do tratamento estão detalhados no trabalho de Duarte (2019).

A tabela 3-1 mostra todos os dados do processo de fabricação das molas que podem ser vistas na Figura 3-2.

Tabela 3-1: Dados de fabricação das molas de SMA (DUARTE, 2019).

<table>
<tr><td rowspan="3">Temperatura</td><td>465C</td><td rowspan="3">Resfriamento</td><td>Água</td><td rowspan="3">Tempo</td><td>30min</td></tr>
<tr><td>490°C</td><td>Ar</td><td rowspan="2">60min</td></tr>
<tr><td>540°C</td><td>Forno</td></tr>
</table>



Figura 3-2: Molas Fabricadas para o Estudo (DUARTE, 2019).

Essas combinações resultaram em um total de 36 amostra sendo 18 com diâmetro primitivo de 6 mm e 18 com 12 mm, destas utilizou-se neste estudo as 18 amostras de molas com 6 mm de diâmetro primitivo. Importante ressaltar que, o resfriamento em água foi feito com água a 20ºC em um recipiente com 6 litros de água. O resfriamento ao ar foi

feito pelo simples resfriamento na temperatura da sala, aproximadamente 25ºC e por fim, o resfriamento ao forno foi feito pelo desligamento do forno e o resfriamento até a temperatura ambiente do mesmo.

No trabalho de Duarte (2019), os testes de tração realizados nestas molas foram feitos utilizando a máquina de tração universal INSTRON 5982 e para o estudo realizado neste trabalho foi necessário conhecer o valor máximo de força para cada mola e este valor será usado como parâmetro para a seleção de alguns componentes do aparato experimental construído.

A figura 3-3 mostra os valores encontrados de força máxima resultante de cada mola, sendo (WC) para as molas resfriadas em água, (AC) para as molas resfriadas ao ar e (OC) para as molas resfriadas no forno e ainda, se indica o tempo de tratamento de cada amostra. Sendo assim, por exemplo, a indicação de “WC 30 min” é relativo a uma mola tratada por 30 minutos na temperatura correspondente e resfriada em água.

A figura 3-3(a) apresenta as molas com diâmetro externo de 6mm e índice de mola 6,6 e (b) mostra os valores de força máxima para as molas com diâmetro de externo de 12 mm e índice de mola de 13,2. Para as molas com diâmetro de 6 mm foi aplicado um deslocamento de 40 mm e para a de diâmetro de 12 mm foi aplicado um deslocamento de 60 mm. Em ambos os casos as molas foram ensaiadas com sete espiras ativas.

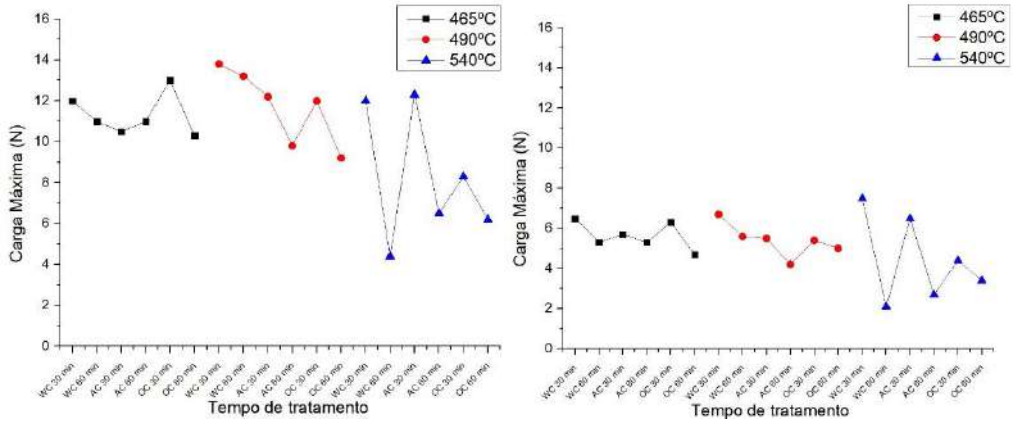


Figura 3-3: (a) Força máxima para molas com diâmetro de 6 mm (b) Força máxima para molas com diâmetro de 12 mm (DUARTE, 2019).

3.2. Protótipo de Teste

Para se avaliar a influência da frequência do carregamento na resposta das molas de SMA, foi projetado e construído o aparato experimental mostrado na figura 3-4 e 3-5. Neste aparato foi utilizado um motor de passo para aplicar os ciclos mecânicos com deslocamentos máximo iguais aos utilizado nos testes quase estáticos feitos por Duarte (2019). O mecanismo utilizado para a transferência força foi um sistema biela-manivela fabricado em madeira e ABS, enquanto a leitura da força proveniente dos carregamentos foi realizada utilizando um suporte fixo e uma célula de carga. Para a variação de temperatura das molas, foi utilizada uma fonte de corrente (aquecimento por efeito joule) que é ligada aos terminais de cada suporte de mola. Por fim, foi montado um mecanismo de tensionamento diretamente ligado ao suporte do motor de passo, e que é responsável por deslocar o conjunto do motor com o sistema mecânico criando a possibilidade de ajustar a tensão inicial na mola, para que desta forma todos os ensaios apresentassem uma mesma condição inicial de carregamento na mola.

As figuras 3-4 e 3-5 apresentam respectivamente um desenho esquemático do protótipo e o sistema final construído.

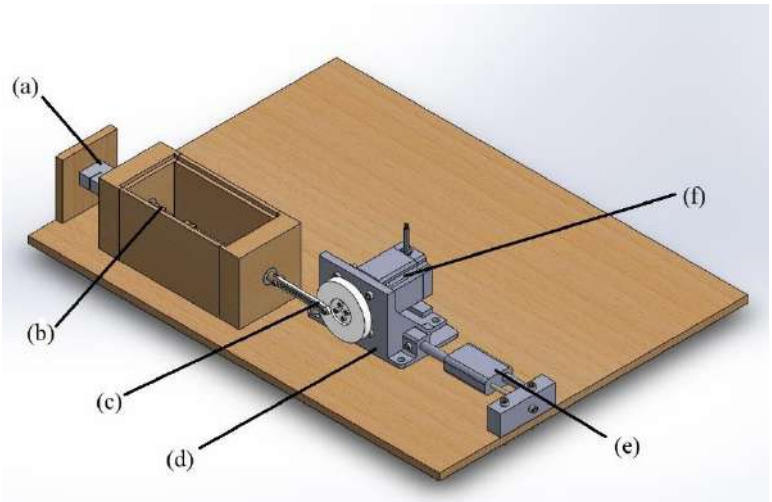


Figura 3-4: Aparato de teste idealizado. – (a): Célula de carga, (b): Suporte das molas, (c): Conjunto biela-manivela, (d): Mancal (e): tensionador, (f): Motor de passo.

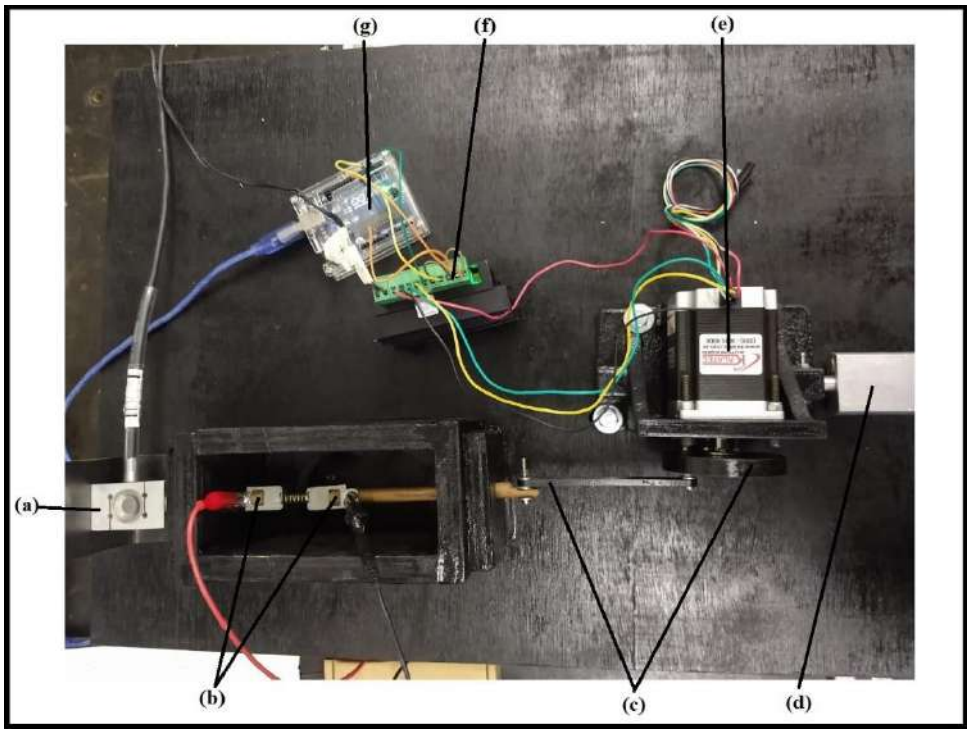


Figura 3-5: Aparelho de Teste desenvolvido – (a): Célula de carga, (b): Suporte das molas, (c): Conjunto biela-manivela, (d): tensionador, (e): Motor de passo, (f): Drive de controle, (g): Arduino UNO.

Lista-se abaixo cada componente escolhido para a montagem do protótipo apresentado na figura 3-5.

Célula de carga: Para este sistema foi utilizada uma célula de carga marca LÍDER modelo CS20 de 20Kgf (Figura 3-6) indicada em (a).



Figura 3-6: Célula de Carga Lider 20 Kgf.

Hastes de suporte das molas: As hastes de suporte das molas foram projetadas de forma a se evitar a passagem de corrente para os outros componentes do sistema, ficando a corrente restrita apenas nas molas. As hastes são indicadas em (b) na figura 3-5.

Estas hastes foram fabricadas em madeira de balsa com diâmetro de 10 mm e comprimentos de 60 mm para aquela que fica montada na célula de carga e 140 mm para a que fica ligada ao conjunto biela-manivela e montadas através rolamentos lineares para mínimo atrito durante ensaio, as hastes são mostradas na figura 3-7(b). Na extremidade de cada haste foram montados suportes de alumínio para a fixação das molas de maneira que a corrente gerada pela fonte passará apenas pelos suportes e pelas molas. É importante comentar que as furações utilizadas para suportes são iguais as utilizadas por Duarte (2019) de modo que as molas terão sete de espiras ativas, semelhante ao trabalho prévio. Os suportes são mostrados na figura 3-7(a).



(a) (b)

Figura 3-7: (a) Suporte das molas, (b) Hastes em madeira.

Fonte de potência: Neste estudo se utilizou a fonte Ps-7000 da iCEL Manaus (figura 3-8) para realizar o aquecimento das molas por efeito Joule.



Figura 3-8: Fonte de potência iCEL Manaus Ps-7000.

Conjunto do sistema Biela-Manivela: O sistema escolhido para produzir um deslocamento controlado nas molas foi o biela-manivela, indicado por (c) na figura 3-5. Este sistema foi escolhido por sua simplicidade de projeto e por ser um sistema eficiente para conversão de rotação em descolamento horizontal. Um detalhe do sistema pode ser visto na figura 3-9.

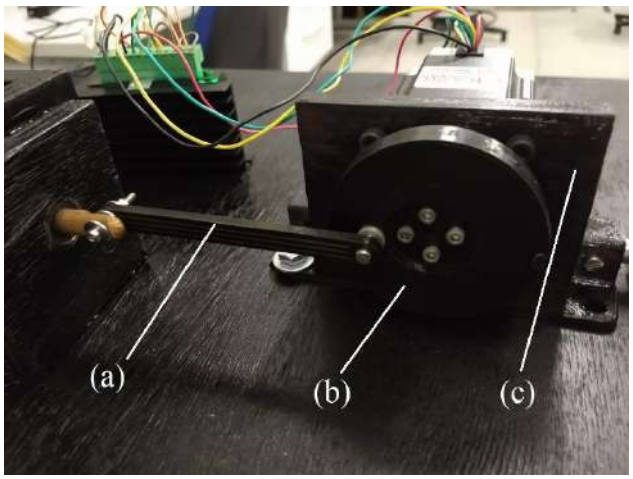


Figura 3-9: Sistema Biela-Manivela. (a): Haste de ligação com o sistema, (b): Volante para conversão do movimento rotativo em horizontal, (c): Mancal para montagem com o motor de passo.

Todo o mecanismo foi fabricado em ABS por impressão 3D com o volante do sistema possuindo 70 mm de diâmetro e furos para a ligação com a haste do conjunto a 40 mm de diâmetro, a haste de ligação possui 100 mm de comprimento e 90 mm entre o centro dos furos para conexão entre o sistema de ensaio e o conjunto biela-manivela e por fim um mancal para suporte do motor de passo onde o sistema conjunto foi montado. Em todo o conjunto, somente o flange de conexão do volante do mecanismo com o eixo do motor foi fabricado em alumínio.

Tensionador: Foi incluído um tensionador linear com curso de até 15 mm que desloca todo o conjunto do motor de passo com o mecanismo biela-manivela, para desta forma ajustar a tensão inicial nas molas antes de iniciar cada ensaio.

Este ajuste é necessário para que todos os ensaios partam de um mesmo patamar. O tensionador é mostrado na figura 3-10 e indicado por (d) na geral do protótipo em 3-5.

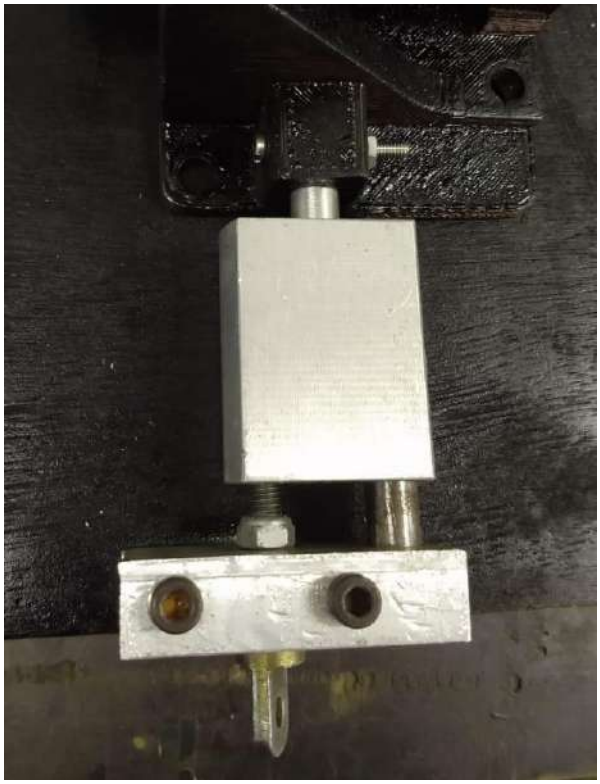


Figura 3-10: Tensionador.

Motor de passo: Neste estudo utilizou-se o motor de passo NEMA23 de 19.0 Kgf.cm da Kalatec, indicado por (e) na figura 3-5 e mostrado em detalhe na figura 3-11(a). Este é um motor bifásico de 8 fios, o que possibilita ligações tanto em paralelo quanto em série, e apresenta uma resolução de 200 passos por ciclo. Dentre as possibilidades do motor, foi escolhido o formato de ligação em série que utiliza apenas 4 dos 8 fios, tendo os outros fechados em pares. Essa escolha foi baseada no manual do motor onde consta que é a opção que oferece maior torque. O detalhe do esquema de ligação é apresentado na figura 3-11(b).



(a) (b)

Figura 3-11: Motor de passo NEMA23(a), Método de ligação dos fios do motor (b).

Drive de Controle: Este aparato utiliza um drive de controle de correntes comumente utilizado junto de motores para trabalhos de alta precisão. Através de um setup prévio é possível ajustar a corrente de entrada de acordo com o tipo de motor e ligação utilizada. Existe ainda a possibilidade de se subdividir os passos do motor para se obter uma melhor resolução e assim maior precisão nos dados aquisitados. Neste estudo foi utilizado o drive de controle Wotion WD-2404 indicado por (f) na figura 3-5 e em detalhes na figura 3-12.



Figura 3-12: Drive de controle Wotion WD-2404.

Este drive fez a ligação do motor com o arduino e tem capacidade de subdividir os passos do motor em até 1/32 de passo. Com essa resolução julgou-se desnecessário uma frequência maior de aquisição pois haveria uma probabilidade de perda de dados por uma frequência muito baixa.

Arduino UNO: o Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica muito utilizada para trabalhos de várias escalas, desde projetos independentes até sistemas mais complexos com um baixo custo e facilidade de utilização. Este é essencialmente programado em C ou C++.

Neste estudo, utilizou-se um arduino UNO, indicado por (g) na figura 3-5 e em detalhe na figura 3-13, para realizar o acionamento do motor, fazer a programação do número de ciclos e ajustar frequência entre cada ensaio. Para tal foi utilizado o software próprio da empresa, o Arduino IDE.



Figura 3-13: Arduino UNO.

3.2.1. Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição neste estudo fez uso de uma ligação simples com um transdutor de força, um condicionador e um software para ler os dados e organizar os inputs para a aquisição. A figura 3-14 apresenta uma imagem esquemática com aparato de teste completo.

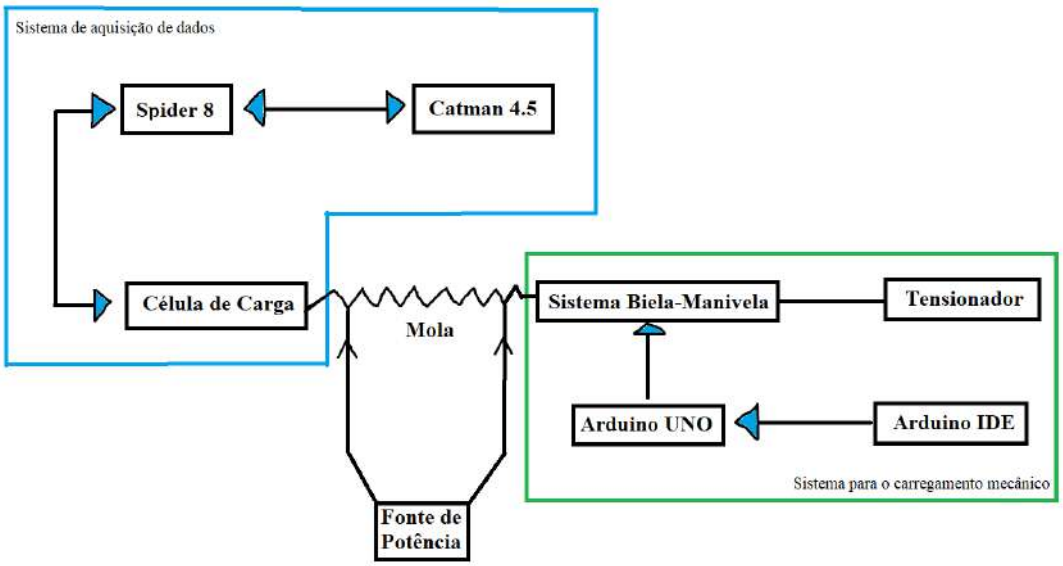


Figura 3-14: Diagrama do aparato de teste.

O sistema de aquisição de dados é destacado na área em azul. Como explicado anteriormente o transdutor utilizado foi uma célula de carga de 20 Kgf. Para aquisição dos dados de carregamento foi utilizado o Spider 8 600Hz da Hottinger Baldwin Messtechnik (Figura 3-15). Este equipamento faz o condicionamento e conversão dos sinais recebidos da célula de carga e por sua vez, os sinais tratados são enviados para o software de leitura utilizado, o Catman 4.5, onde foi feito tanto a leitura dos dados aquisitados quanto a seleção dos parâmetros de aquisição para casa ensaio.



Figura 3-15: Spider 8 Hottinger Baldwin Messtechnik de 600Hz.

No Catman, foram escolhidos um fundo de escala de 30N baseado dos resultados dos testes realizados por Duarte (2019) e uma taxa de aquisição de 100 Hz. Esta não modificada, pois, o drive de controle do motor (g) tem a possibilidade de ajustar subdivisão dos passos diretamente e sendo assim, tornando-se desnecessário quaisquer alterações.

3.2.2. Sistema de Carregamento Mecânico

Para a realização dos ciclos de carregamento mecânico nas molas foi idealizado um sistema biela-manivela a ser acionado via um motor de passo. O esquemático deste sistema pode também ser observado na figura 3-14 destacada em verde.

Este sistema contou com o sistema biela-manivela já apresentado acima, e um tensionador para auxiliar no ajuste da tensão inicial presente na mola e todo o sistema foi controlado utilizando uma placa de Arduino UNO.

3.3. Procedimento Experimental

Nesta dissertação foram utilizadas as molas helicoidais de SMA com diâmetro externo de 6mm e com índice de mola de 6,6. Com este conjunto de molas será possível analisar a influência parâmetros de fabricação na resposta das molas a carregamentos dinâmicos em diversas frequências e temperaturas de trabalho.

O procedimento experimental foi realizado nas frequências de 0,5Hz, 1,0Hz, 1,5Hz, 2,0Hz e 2,5Hz com em temperatura ambiente (0,0A) e com 1,5A e 2,5A de corrente aplicadas nas molas. Utilizando a mola tratada a 465ºC, resfriada a água e tratada por 30 minutos foi feito um teste sobre a mola descarregada com as correntes selecionadas para os testes. O objetivo deste teste foi chegar a um valor aproximado da temperatura atingida pelas molas para cara corrente aplicada. Para este teste foi utilizado um termopar de tipo K da marca Omega com fio de 0,0015” de diâmetro e aplicadas correntes de 1,5A e 2,5A onde se observou as temperaturas de 49ºC e 78ºC respectivamente. Enquanto para a 0,0A se utilizou a temperatura ambiente de aproximadamente 25ºC.

Espera-se que temperatura das molas apresente variações ao longo dos ciclos dinâmicos, porém ainda é pertinente ter o conhecimento do valor de cada temperatura inicial pois assim será possível dizer em qual fase a mola estará trabalhando. A tabela 3-2 apresenta a sequência de passos para cada ensaio.

Tabela 3-2: Sequência de procedimentos para ensaio

Procedimentos pré-ensaio	• Montagem das molas nos suportes; • Ciclo térmico pré-ensaio para remoção de qualquer deformação presente nas molas; • Tensionamento do sistema de carregamento mecânico; • Preparar o software Catman 4.5 para a aquisição de dados; • Ajustar a frequência de carregamento e o número de ciclos no programa escrito no software Arduino IDE.
Procedimentos de ensaio	• Iniciar o aquecimento da mola via efeito joule aguardando 60 segundos antes de iniciar ciclo mecânico; • Inicia-se a gravação dos dados no Catman para verificar, durante os primeiros 5 segundos, a presença de ruídos no sistema no início da gravação; • Inicia-se o carregamento mecânico através da execução do programa em Arduino; • Acompanha-se os dados aquisitados em um gráfico Carga x Tempo diretamente no software Catman para verificar presença de ruídos ou quaisquer interferências ao longo do ensaio; • Ao final dos ciclos, aguardar 5 segundos e interromper a gravação de dados.
Procedimentos pós-ensaio	• Após o final do ensaio realiza-se um ciclo térmico para remover deformações residuais; • Desmontagem das molas dos suportes.

Após a realização de todos os ensaios, foi calculada a energia dissipada por ciclo em cada mola e a rigidez de cada mola. Para o cálculo da energia dissipada, calculou-se simplesmente a área do laço de histerese onde sabe-se, pela bibliografia, que é correspondente a dissipação de energia em um determinado ciclo.

Por sua vez, para o cálculo da rigidez, foi utilizada a seguinte metodologia. Tomou-se os pontos relativos aos últimos 10 mm no movimento de transformação direta, isto é, entre 30 e 40 mm, e os pontos nos 10 mm iniciais da transformação reversa, isto é, de 40 a 30 mm de deslocamento aplicado a mola. Tendo estes pontos, foram calculadas as inclinações da curva no sentido de transformação direta e reversa e calculada a rigidez a partir a tangente. Uma vez calculadas as tangentes em ambas foi falta uma média e o valor resultante foi considerada a rigidez da mola.

Entretanto, para tentar simplificar o método de análise da rigidez, realizou-se a seguinte aproximação: calculou-se o valor da rigidez obtidos em 5 ensaios diferentes utilizando o método descrito acima e comparou-se com o valor de rigidez que pode ser calculado dividindo o valor de tensão encontrado com máximo deslocamento (d= 40mm) por este mesmo valor chegando a um valor pontual de rigidez.

Para esta comparação utilizou-se a mola tradada a 465ºC, por 30 minutos e resfriada a água. Após as comparações observou-se as variações apresentadas na tabela 3-3 abaixo.

Tabela 3-3: Comparação entre os métodos de cálculo da rigidez.

M01-T01	Frequência (Hz)	0,5Hz	1,0Hz	1,5Hz	2,0Hz	2,5Hz
Método Direto	Rigidez (N/mm)	0,1363	0,1373	0,1743	0,1738	0,1765
Método Analítico		0,1411	0,1314	0,1630	0,1663	0,1591
Dif. Percentual		3,4153%	-4,4441%	-6,9191%	-4,4682%	-10,9073%

Observa-se pela tabela 3-3 que a maior diferença percentual foi de 11% sendo este um valor válido quando se leva em conta fatores de segurança utilizados em projetos mecânicos onde, para um fator de 1,5 para o projeto da mola, uma diferença de até 50% estaria dentro da margem de erro. É importante ressaltar que, no trabalho com ligas SMA, a não linearidade do comportamento das molas fabricadas adiciona grande complexidade para fabricar molas com valores que atendam requerimentos específicos e, sendo assim, razoável utilizar um fator de segurança para garantir que a mola utilizada irá atender ao que for requisitado.

4. Resultados Experimentais

A Apresentação dos resultados e sua análise serão realizadas em duas partes, primeiramente serão analisados os resultados encontrados, e é realizada uma comparação com resultados obtidos em estudos semelhantes encontrados na literatura. Posteriormente será feita uma análise comparativa dos resultados, para se determinar quais parâmetros de fabricação apresentaram maior influência no comportamento das molas.

4.1. Análise inicial: Resultados obtidos por Duarte (2019)

Para um melhor entendimento dos resultados obtidos é importante analisar a relação de alguns dados obtidos por Duarte (2019) em adição ao conceito de transformações multi-estágios. Nesta seção é realizada uma breve discussão de como os dados obtidos por Duarte nos ensaios de DSC podem se relacionar com este conceito e, dependendo da quantidade de energia dissipada por cada mola, pode-se ter o entendimento diferente de qual fase intermediária ocorreu em cada caso descrito.

Em 2014, Ravari fez um estudo da influência da concentração de níquel e das condições do processo de envelhecimento na transformação martensítica multi-estágios ou MMT (*multistage martensitic transformation*). Nele, Ravari analisou que, diferentes picos de transformação podem indicar a ocorrência de um processo de MMT durante a transformação de fase tanto martensítica quanto austenítica. A figura 4-1 mostra um exemplo dos resultados de DSC obtidos por Ravari (2014) em seu estudo.

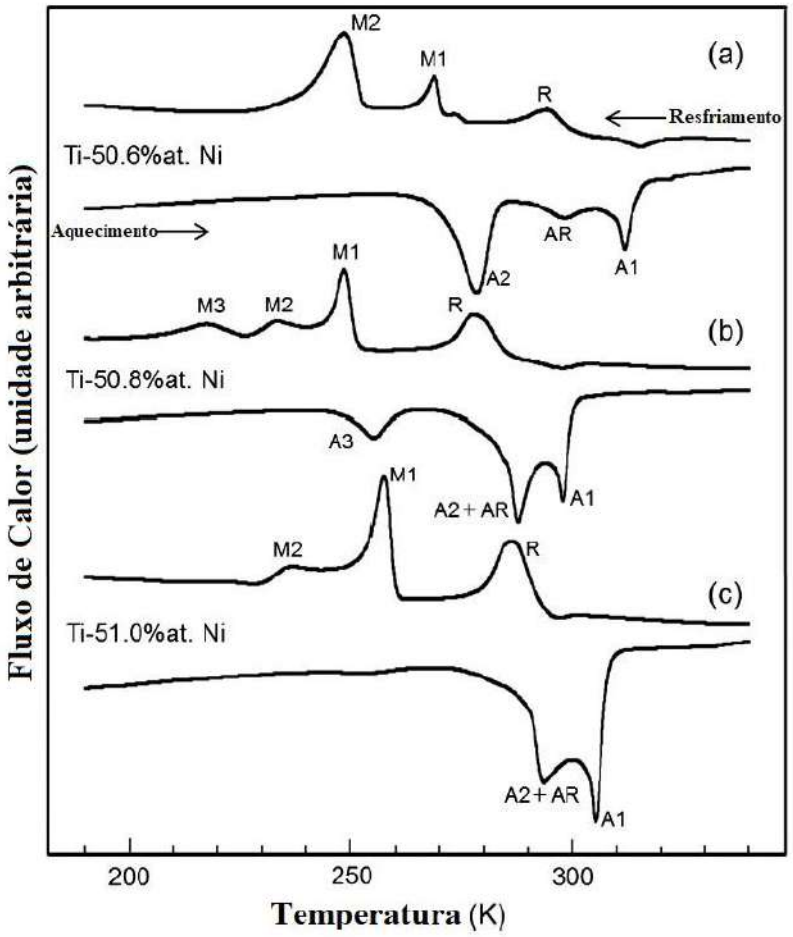
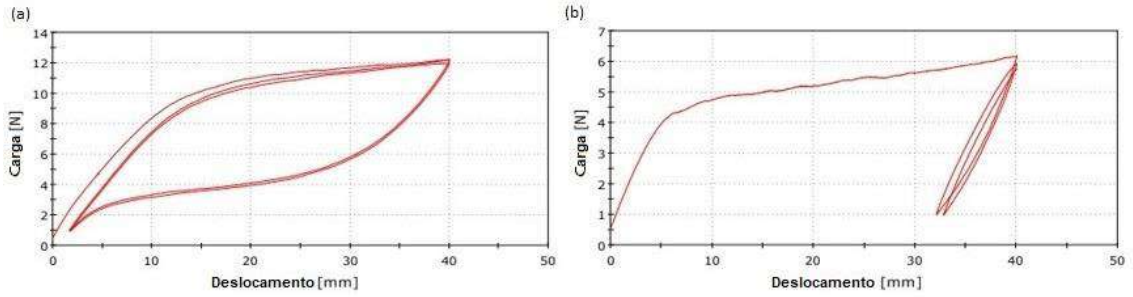


Figura 4-1: Curvas de DSC para resfriamento e aquecimento obtidas por Ravari. (a) Ni-Ti 50.6, (b) Ni-Ti 50.8 e (c) Ni-Ti 51 de % de níquel envelhecida a 773K por 60 minutos após tratamento de solubilização a 1223K por 60 minutos. (RAVARI, 2014).

Sendo assim espera-se que, em uma análise dinâmica, as molas apresentem comportamentos que reflitam a existência destas múltiplas transformações, podendo apresentar variações no laço de histerese que não foram percebidas no estudo anterior feito por Duarte (2019).

Seguindo para a análise inicial dos resultados obtidos por Duarte (2019) é possível observar na figura 4-2 ensaio de tração, à temperatura ambiente, com um deslocamento de 10mm/min em duas molas de índice 6,6, mesmo tipo mola que será analisada nesta dissertação. A mola tratada a 465ºC por 30 minutos e resfriada a água apresenta um comportamento pseudo-elástico com deformação residual na casa de 1 mm, enquanto

para a mola tratada a 540ºC por 60 minutos e resfriada ao forno observa-se um comportamento de memória de forma clássico, com deformação residual de em torno de 32mm.



(a) (b)

Figura 4-2: (a) Mola aquecida a 465ºC por 30 minutos e resfriada a água, (b) Mola aquecida a 540ºC por 60 minutos e resfriada no forno. (DUARTE, 2019)

Inicialmente, espera-se que as molas resfriadas por meios mais abruptos, tratadas por 30 minutos e em temperaturas menores apresentem um comportamento pseudo-elástico, enquanto aquelas resfriadas mais lentamente, tratadas por 60 minutos e em temperaturas maiores tenham comportamentos de memória de forma clássico. Entretanto, neste estudo, serão realizados ensaios dinâmicos em várias frequências e para várias faixas temperaturas, sendo assim, espera-se comportamentos diferentes em relação ao que foi observado na figura 4-2.

Tomando como exemplo as molas apresentadas na figura 4-2. Pode-se esperar que a mola em 4-2(a) venha a apresentar uma queda no tamanho da área do laço de histerese com o aumento da temperatura de trabalho, uma vez que a tensão necessária para transformação será maior do que em temperatura ambiente em consequência de a temperatura da mola estar muito acima do valor de Af. Esse fato poderia levar a ter uma parcela menor do fio a ser totalmente ser transformada, sempre lembrando que aqui, refere-se a parcela do fio a partir da linha neutra que passa por tensões relevantes uma vez que na linha neutra as tensões são nulas.

Por outro lado, para as molas que tiverem um comportamento clássico de memória de forma, como a apresentada em 4-2(b), espera-se que, em temperaturas maiores, elas irão se aproximar de um comportamento mais próximo do pseudo-elástico.

Para análise de cada mola foi realizado um número pré-determinado de 30 ciclos para que o sistema se acomode e o gráfico de histerese se estabilize. Uma vez estabilizados, analisou-se o último ciclo do ensaio de cada mola. A figura 4-3 apresenta como exemplo os 30 ciclos da mola aquecida a 465ºC por 30 minutos, resfriada a água no ensaio com temperatura de 25ºC e frequência de 2,5Hz. Pode-se observar que a partir do 15º ciclo a diferença entre os picos e vales passa a ser inferior 0,05N, podendo ser considerado estável.

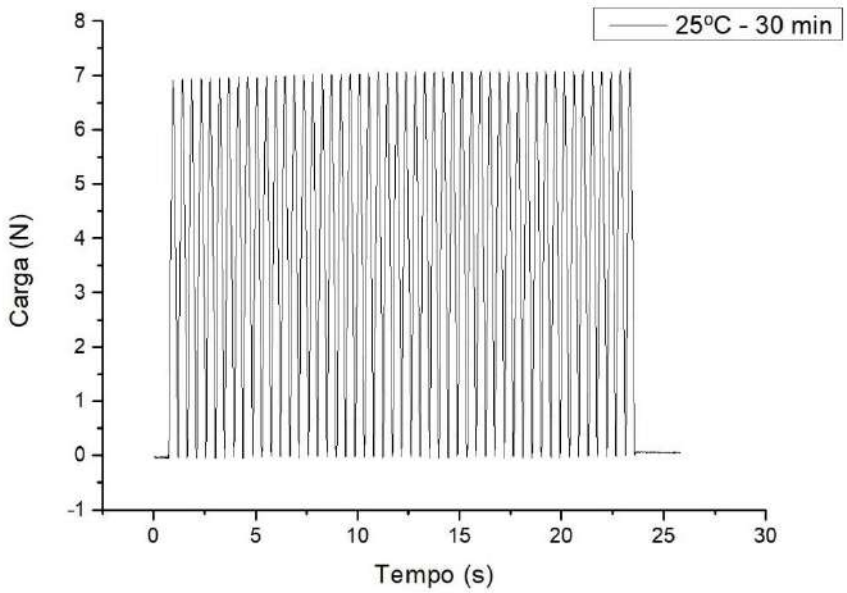
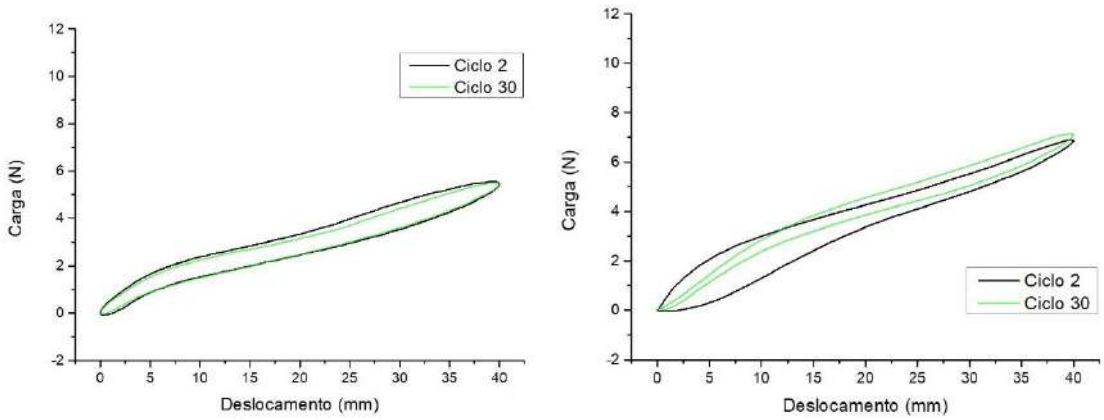


Figura 4-3: Estabilização dos Ciclos de carregamento em uma mola com diâmetro externo de 6mm, índice de mola 6,6, aquecida a 465ºC por 30 minutos e resfriada em água.

Além disso, é importante considerar a influência da energia dissipada em forma de calor que, com o ganho de temperatura da amostra, mesmo sem nenhuma corrente aplicada, as molas podem apresentar comportamentos diferentes e/ou apresentarem diferenças na quantidade de energia dissipada pela presença maior da fase austenítica em relação a fase martensítica.

Para tal, foi feita uma comparação entre o último ciclo da mola com diâmetro externo de 6mm, índice de mola 6,6, aquecida a 465ºC por 30 minutos e resfriada em água, apresentada na figura 4-3, e o segundo ciclo dos ensaios a 0,5 Hz e 2,5 Hz. O

primeiro ciclo de cada ensaio foi descartado para a acomodação de possíveis folgas no sistema. A figura 4-4(a) e 4-4(b) mostram a comparação para 0,5 Hz e 2,5 Hz respectivamente.



(a) (b)

Figura 4-4: Comparação entre o ciclo inicial e o ciclo final para mola com diâmetro externo de 6mm, índice de mola 6,6, aquecida a 465ºC por 30 minutos e resfriada em água: (a) ensaio com frequência de 0,5 Hz, (b) ensaio com frequência de 2,5Hz.

Observa-se que, no ensaio realizado à baixa frequência apresentado em (a), os gráficos de histerese são muito parecidos, com carga máxima idêntica e quase nenhuma diferença na área do laço. Por outro lado, nos ensaios realizados à frequência de 2,5 Hz, observa-se uma diferença considerável no formato e na área do gráfico de histerese, bem como uma diferença no valor de carga máxima. Essas diferenças indicam que a energia liberada em forma de calor teve influência no comportamento da mola uma vez que, em um ambiente sem refrigeração forçada no ensaio 0,5 Hz de frequência, a mola teve mais tempo para o resfriamento natural levando a um comportamento mais uniforme ao longo dos ciclos e, no caso do ensaio com 2,5 Hz de frequência a mola, sofreu uma mudança de fase pelo aquecimento derivado da dissipação de energia e com isso apresentou diferenças mais aparentes em relação aos ciclos iniciais do ensaio.

Por fim, a aplicação de correntes nas molas foi realizada para observar a variação no comportamento das molas para diferentes temperaturas de trabalho onde, em temperaturas mais elevadas, mola pseudo-elásticas tendem a apresentar uma redução na dissipação de energia pela temperatura de trabalho estar muito acima da temperatura de

início da transformação martensítica M_s, enquanto se observa um aumento no valor de força de resposta da mola ao carregamento.

Entretanto também existe a possibilidade da ocorrência de transformações de fases intermediárias que muitas vezes reduzem o efeito de memória de forma.

Essas fases intermediárias podem ser avaliadas pelo estudo dos resultados de DSC apresentados em Duarte (2019). Desta forma pode-se identificar quais molas poderão apresentar fases intermediarias, que irão alterar o tamanho e o formato do laço de histerese. A figura 4-5 apresenta o resultado do DSC feito para a mola tratada a 465º por 30 minutos resfriada em água. No Anexo II pode-se observar todos os resultados de DSC encontrados por Duarte, 2019.

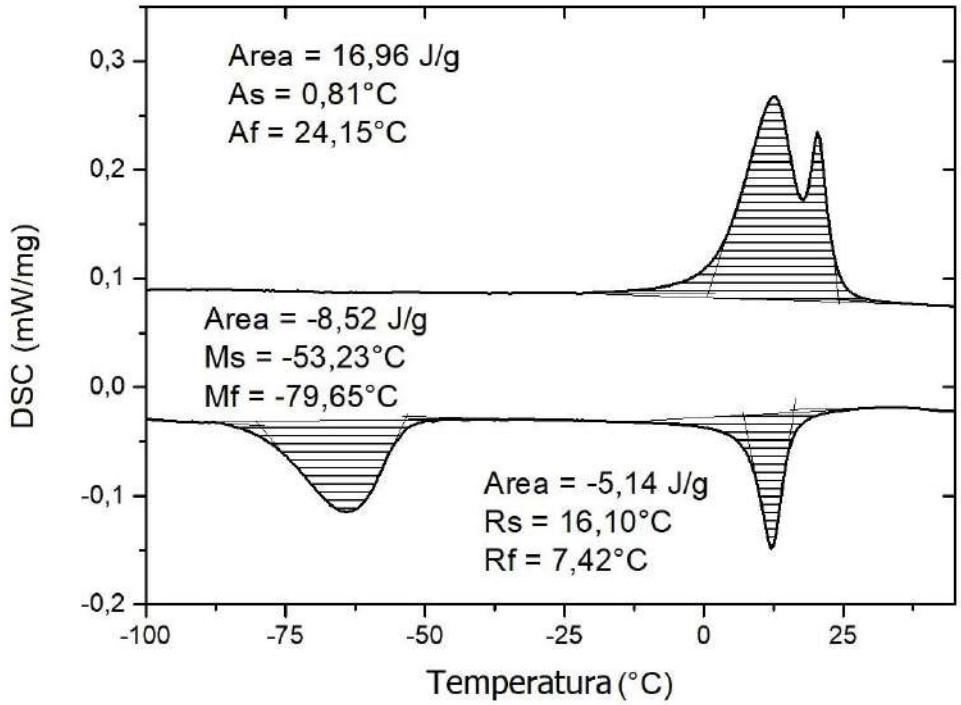


Figura 4-5: DSC referente a mola tratada a 465º por 30 minutos e resfriada em água. (Duarte, 2019).

No resultado de DSC apresentado (figura 4-5), pode-se observar que na transformação austenítica, durante o aquecimento, a ocorrência de dois picos juntos, o que indica uma transformação que ocorreu em mais de uma etapa (Ravari, 2014). Já na

transformação martensítica que ocorre durante o resfriamento, é possível observar que houve a ocorrência de dois picos separados, indicando a presença de uma fase intermediária com temperaturas de início e fim de transformação distintas. Esta fase é comumente descrita como fase R. Estas ocorrências de transformação de multi-estágio têm influência no comportamento da mola, alterando o formato do laço de histerese e/ou diminuindo a quantidade de energia dissipada tanto para molas com efeito de memória de forma clássico quanto para molas pseudo-elásticas.

Para começar a análise dos resultados, primeiramente é necessário apresentar a codificação utilizada para identificar cada mola fabricada e para tal, a tabela 4-1 apresenta estes dados identificando cada mola com base no seu processo de fabricação.

Tabela 4-1: Identificação das Molas segundo dados de fabricação. (DUARTE, 2019)

Mola	Tempo de Tratamento	Temperatura de tratamento	Método de Resfriamento
M01	T01: 30 minutos	465°	Água
M05			Ar
M09			Forno
M13		490°	Água
M17			Ar
M21			Forno
M25		540°	Água
M29			Ar
M33			Forno
M01	T02: 60 Minutos	465°	Água
M05			Ar
M09			Forno
M13		490°	Água
M17			Ar
M21			Forno
M25		540°	Água
M29			Ar
M33			Forno

Após identificar corretamente cada mola, analisou-se os dados do estudo de DSC feito por Duarte, identificando quais molas apresentaram fases intermediárias, e estes

resultados são apresentados na tabela 4-2. Na figura 4-6 é apresentada uma das molas onde não é observada a presença de fases intermediárias

Tabela 4-2: Análise dos gráficos de DSC feitos por Duarte (2019).

Mola	Aquecimento	Resfriamento
M01 -T01	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M05 - T01	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M09 - T01	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M13 - T01	Transformação austenítica simples	Dois picos de transformação separados
M17 - T01	Transformação austenítica simples	Dois picos de transformação separados
M21 - T01	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M25 - T01	Transformação austenítica simples	Transformação Martensítica simples
M29 - T01	Transformação austenítica simples	Transformação Martensítica simples
M33 - T01	Transformação austenítica simples	Dois picos de transformação separados
M01 - T02	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M05 - T02	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M09 - T02	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M13 - T02	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M17 - T02	Transformação austenítica simples	Dois picos de transformação separados
M21 - T02	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação separados
M25 - T02	Transformação austenítica simples	Dois picos de transformação juntos
M29 - T02	Dois picos de transformação juntos	Dois picos de transformação juntos
M33 - T02	Transformação austenítica simples	Dois picos de transformação juntos

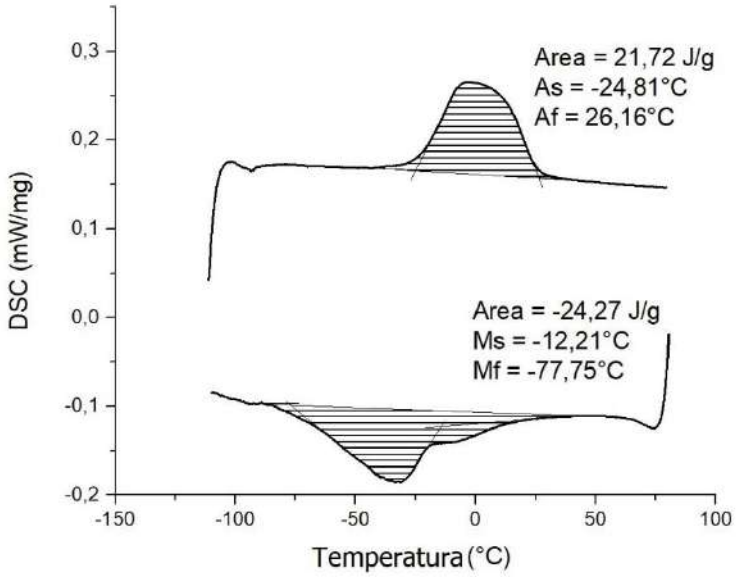


Figura 4-6: Mola M29-T01- Aquecida a 540 ºC, por 30 minutos e resfriada ao ar (DUARTE, 2019).

Analisando-se a tabela 4-2 pode-se observar que a maior parte das molas apresentaram mais de um pico durante o aquecimento ou resfriamento, indicando a ocorrência de uma transformação multifásica e por este motivo, podem apresentar alterações no gráfico de histerese.

4.2. Resultados Experimentais

Nesta parte do capítulo serão apresentados os dados obtidos nos testes experimentais de forma simplificada, apresentando e comparando alguns dos gráficos entre os diferentes parâmetros de teste. Sendo assim, observa-se a variação dos resultados em relação a variação de frequência e a variação na temperatura da mola.

A figura 4-7 mostra a comparação entre os resultados obtidos na mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água, em temperatura ambiente (25ºC) e com 5 diferentes frequências de carregamento: 0,5Hz, 1,0Hz, 1,5Hz, 2,0Hz e 2,5Hz. O ciclo mecânico foi realizado utilizando um deslocamento prescrito de 40 mm.

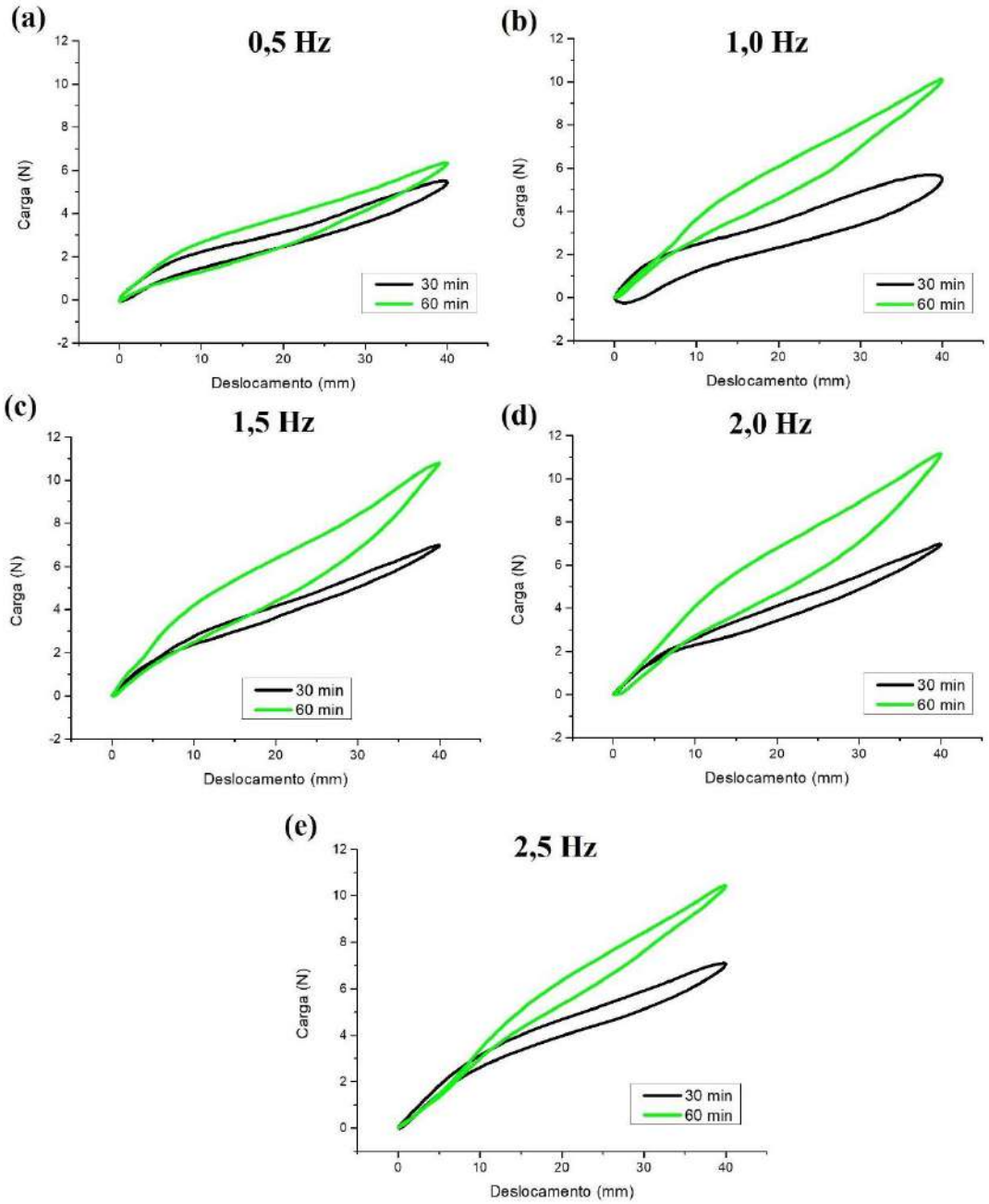


Figura 4-7: Comparação dos laços de histerese em temperatura ambiente (25ºC) (a): Frequência de 0,5Hz, (b): Frequência de 1,0Hz, (c) Frequência de 1,5Hz, (d) Frequência de 2,0Hz, (e): Frequência de 2,5Hz.

Este parâmetro é de grande importância na análise de molas uma vez que a relação entre frequência e a energia que a mola pode dissipar é um fator importante para projetos que tem como objetivo a atenuação de vibrações. Na figura 4-7 é possível observar que

de modo geral a mola tratada termicamente durante 60 minutos apresentou uma resposta de tensão maior que a mola tratada durante 30 minutos e ainda, observa-se que para o aquecimento realizado durante 30 minutos, a rigidez da mola apresentou uma mudança mais significativa na passagem dos ensaios a 1,0 Hz de frequência para 1,5 Hz e 2,5Hz onde se observou um aumento de mais de 25%, e após, os valores de rigidez se mantiveram constantes entre as frequências de 1,5 Hz, 2,0 Hz e 2,5 Hz.

Por sua vez, na mola aquecida por 60 minutos observa-se uma grande mudança na rigidez da mola nos ensaios realizados com frequências acima de 0,5 Hz onde se registou aumentos acima de 50% enquanto, na faixa de frequências entre 1,0 Hz e 2,5 Hz ocorreram variações, porém muito menores em comparação com a frequência de 0,5 Hz, sendo a maior variação da ordem de 10%. A tabela 4-3 mostra a variação entre em porcentagem da rigidez entre cada ensaio enquanto a figura 4-8 monstra a representação gráfica da mesma.

Tabela 4-3: Variação percentual da rigidez da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio em temperatura ambiente (25ºC).

Tempo	Frequência	0,5 Hz	1,0 Hz	1,5 Hz	2,0 Hz	2,5 Hz
30 min	Rigidez da Mola (N/mm)	0,1362	0,1372	0,1742	0,1737	0,1765
	Variação (%)	0,00%	0,734%	27,89%	27,52%	29,54%
			0,00%	26,95%	26,60%	28,60%
				0,00%	-0,29%	1,29%
					0,00%	1,58%
60 Min	Rigidez da Mola (N/mm)	0,1585	0,2522	0,2700	0,2787	0,2605
	Variação (%)	0,00%	59,15%	70,35%	75,67%	64,35%
			0,00%	7,03%	10,51%	3,27%
				0,00%	3,24%	-3,52%
					0,00%	-6,55%

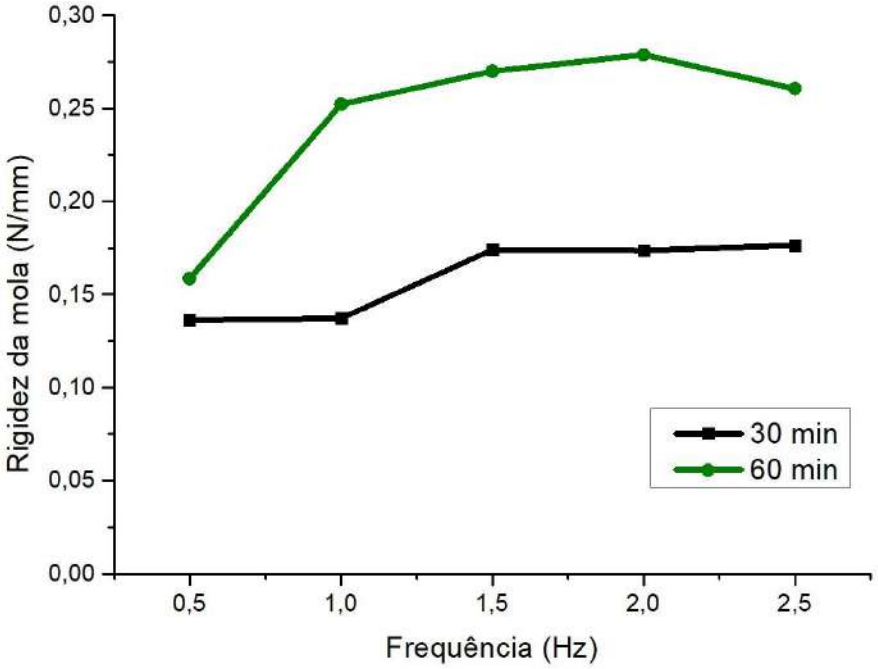


Figura 4-8: Comparação da rigidez a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio em temperatura ambiente (25ºC).

Entende-se a partir destas comparações que a variação da frequência teve efeito relevante no valor máximo de rigidez registrada durante os testes, sendo maior o quão maior é a frequência de ensaio e este fato se deve ao ganho de temperatura em virtude do calor gerado pela dissipação de energia onde, para uma mesma corrente aplicada, as molas ensaiadas em frequências maiores irão atingir temperaturas mais elevadas nos últimos ciclos de ensaio.

Para melhor visualização foi feita uma comparação de uma mola tratada a 465ºC por 30 minutos e resfriada a água e uma outra mola em que somente foi alterado o tempo de tratamento para 60 minutos. São apresentados na figura 4-9 os laços de histerese para cada frequência de carregamento.

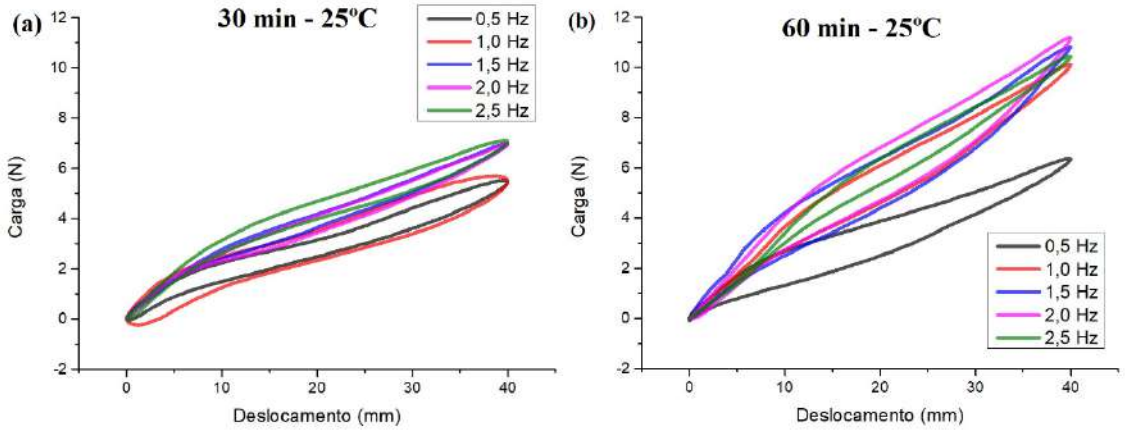


Figura 4-9: Comparação do laço de histerese por frequência de ensaio para a mola tratada a 465ºC e resfriada a água e ensaiada em temperatura ambiente (25ºC). (a): Tempo de tratamento de 30 minutos, (b): Tempo de tratamento de 60 minutos.

Na figura 4-9, observa-se com mais clareza as mudanças da rigidez mencionadas anteriormente. No figura 4-9(a) é possível observar a diferença entre os ensaios a 0,5 Hz e 1,0 Hz em comparação aos demais de frequências 1,5 Hz 2,0 Hz e 2,5 Hz e nota-se que, dentre as molas tratadas por 30 minutos a diferença é consideravelmente menor em relação ao que se visualiza na figura 4-9(b), onde é visível que a transformação de fase pelo calor gerado influenciou consideravelmente no comportamento da mola na comparação entre o ensaio com frequências de 0,5 Hz para as demais frequências de 1,0 Hz a 2,5 Hz.

Comparados os valores de rigidez, e tendo-se em vista que a área do laço representa a quantidade de energia que foi dissipada pela mola, realizou-se uma comparação da quantidade de energia dissipada em cada frequência utilizada. A figura 4-10 mostra esta comparação.

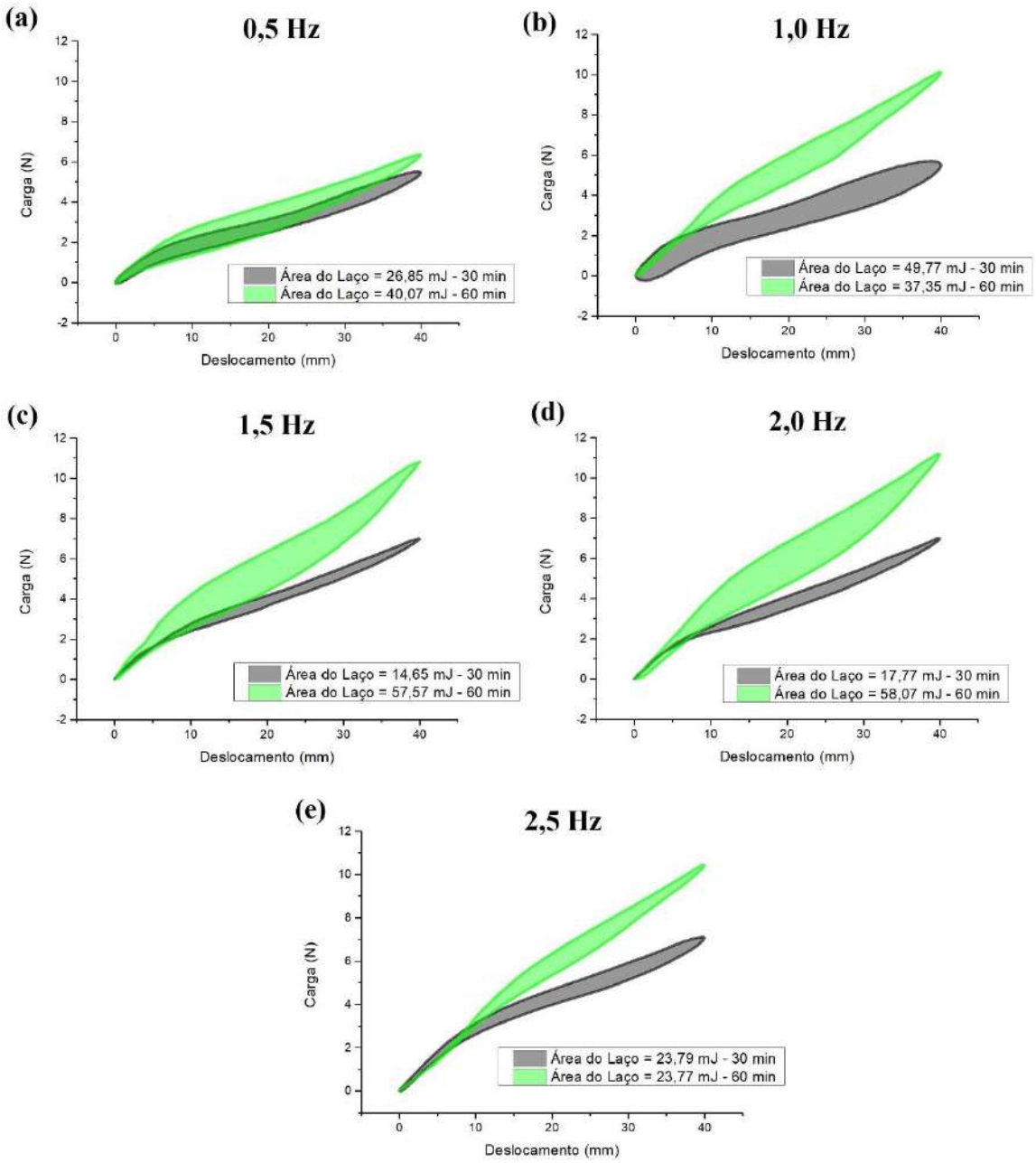


Figura 4-10: Comparação da área do laço de histerese em relação da frequência de ensaio para mola a tratada a 465ºC por 30 min (Cinza) e 60 min (Azul) e ensaiada em temperatura ambiente (25ºC). (a): 0,5Hz (b): 1,0Hz (c): 1,5Hz (d): 2,0Hz (e): 2,5Hz.

Na figura 4-10 observa-se que a área do laço para a mola tratada por 30 minutos (em cinza) apresentou uma energia dissipada média de 26,56 mJ enquanto a média da

mola tratada por 60 minutos, mostrada em azul, é de 43,37 mJ, apresentando um aumento de 63,28%.

Novamente foi feita uma comparação de todos resultados obtidos apresentando a variação em porcentagem da energia dissipada pelas molas em cada caso. Essa comparação segue na tabela 4-4 seguida novamente da representação gráfica na figura 4-11.

Tabela 4-4: Variação percentual da dissipação de energia para ensaio em temperatura ambiente (25ºC).

Tempo	Frequência	0,5 Hz	1,0 Hz	1,5 Hz	2,0 Hz	2,5 Hz
30 min	Energia Dissipada (mJ)	26,85	49,77	14,65	17,77	23,77
	Variação (%)	0,00%	85,36%	-45,45%	-33,82%	-11,47%
			0,00%	-70,56%	-64,29%	-52,24%
				0,00%	21,29%	62,25%
					0,00%	33,76%
60 Min	Energia Dissipada (mJ)	40,07	37,35	57,57	58,07	23,79
	Variação (%)	0,00%	-6,79%	43,67%	44,92%	-40,63%
			0,00%	54,14%	55,46%	-36,31%
				0,00%	0,86%	-58,68%
					0,00%	-59,03%

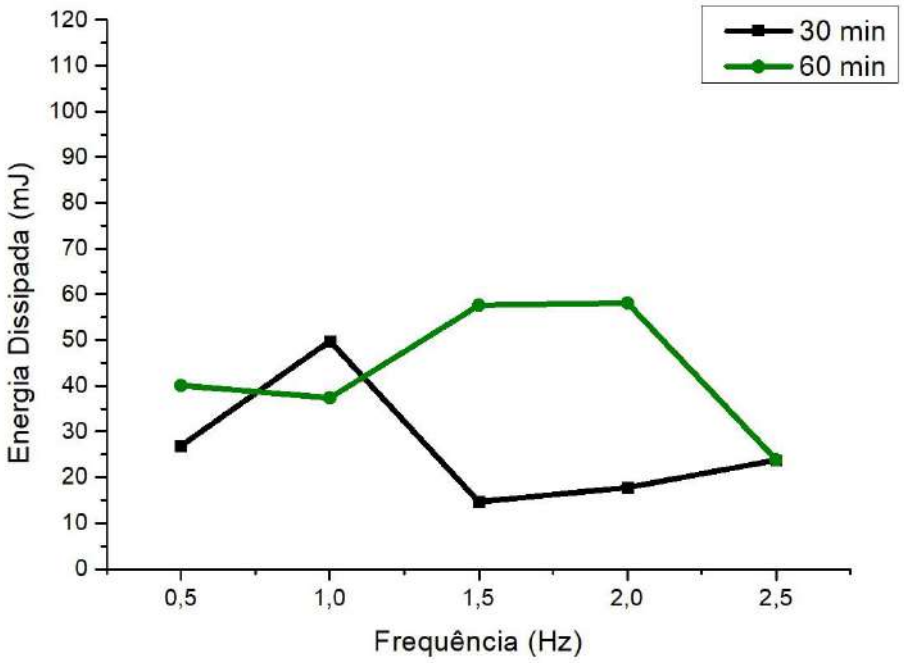


Figura 4-11: Comparação da energia dissipada a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio em temperatura ambiente (25ºC).

No caso dessa comparação, foi observado que para a mola tratada por 30 minutos nas frequências de carregamento de 0,5 Hz e 1,0 Hz apresentaram valores maiores de dissipação de energia enquanto que, para a mola tratada por 60 minutos, nas frequências de 1,5 Hz e 2,0 Hz ocorreram os maiores resultados em relação ao total de energia dissipada.

Seguindo, a figura 4-12 apresenta a comparação dos laços de histerese no ensaio com 1,5A de corrente para a mola tratada 465ºC, por 30 e 60 minutos e resfriada em água.

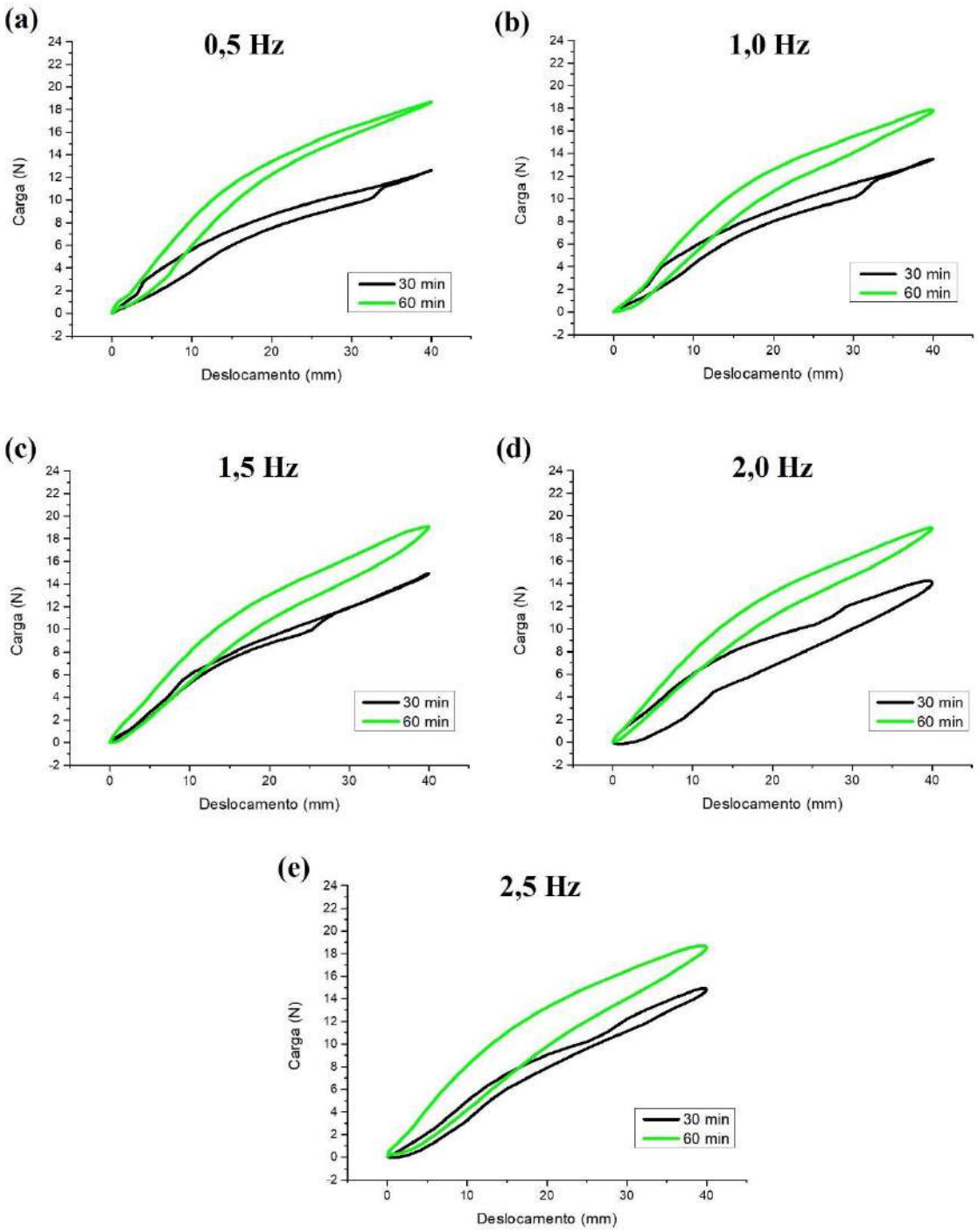


Figura 4-12: Comparação dos laços de histerese com temperatura de 49ºC (a): Frequência de 0,5Hz, (b): Frequência de 1,0Hz, (c) Frequência de 1,5Hz, (d) Frequência de 2,0Hz, (e): Frequência de 2,5Hz.

Novamente, observa-se que as molas tratadas por 60 minutos apresentaram valores força maiores levando a uma rigidez máxima maior em relação as molas tratadas por 30 minutos. As comparações de rigidez com a diferença percentual podem ser vistas na tabela 4-5 seguida da representação gráfica da mesma na figura 4-13.

Tabela 4-5: Variação percentual da rigidez das molas para ensaio com temperatura de 49ºC.

Tempo	Frequência	0,5 Hz	1,0 Hz	1,5 Hz	2,0 Hz	2,5 Hz
30 min	Rigidez da Mola (N/mm)	0,3155	0,3375	0,3737	0,35150	0,3707
	Variação (%)	0,00%	6,97%	18,46%	11,41%	17,51%
			0,00%	10,74%	5,15%	9,85%
				0,00%	-5,95%	-0,80%
					0,00%	5,48%
60 Min	Rigidez da Mola (N/mm)	0,4668	0,4448	0,4768	0,4723	0,4633
	Variação (%)	0,00%	-4,71%	2,14%	1,18%	-0,75%
			0,00%	7,20%	6,18%	4,16%
				0,00%	-0,94%	-2,83%
					0,00%	-1,91%

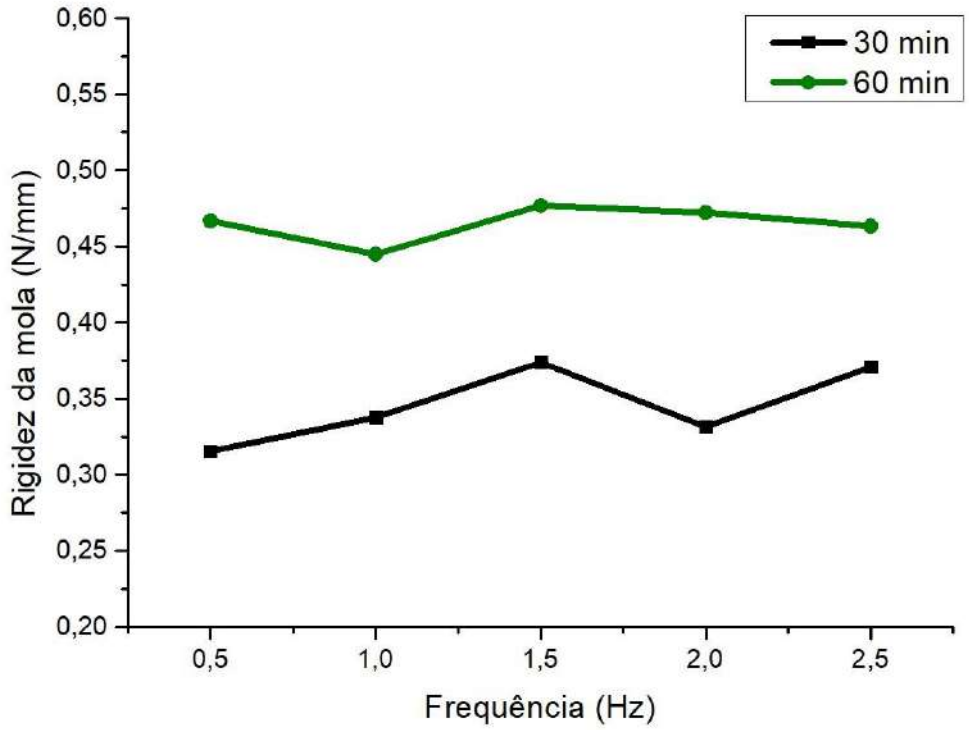


Figura 4-13: Comparação da rigidez a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio com temperatura de 49ºC.

Analisando os resultados, observa-se que, para os ensaios em temperaturas mais elevadas a variação da rigidez apresentada pelas molas é consideravelmente menor em relação ao que foi observado no ensaio em temperatura ambiente.

A razão para tal é que, quando trabalhando em temperaturas mais elevadas a mola ensaiada está em fase austenítica, apresentando assim uma rigidez mais próxima entre os diferentes ensaios realizados. Por este motivo, a diferença entre os gráficos para diferentes frequências mostrado anteriormente tende a ser reduzida, uma vez que mesmo entre as cinco diferentes frequências a fase presente é a mesma. A figura 4-14 mostra uma nova comparação para os ensaios com temperatura de 49ºC.

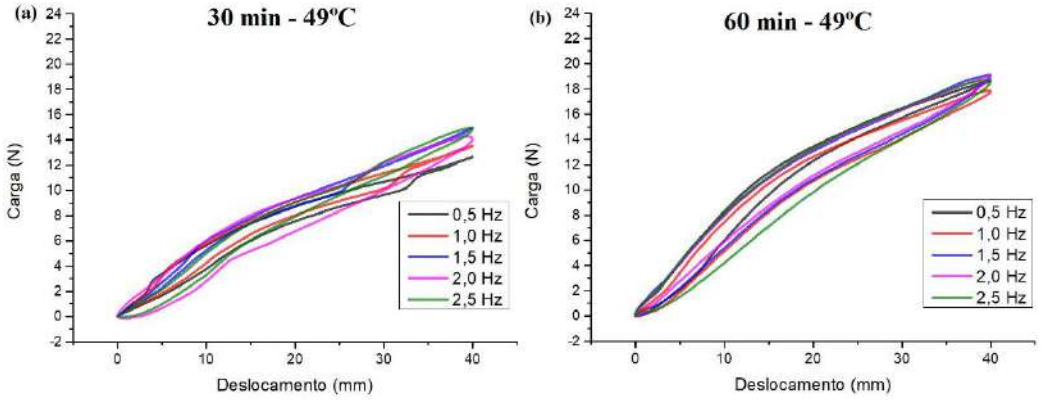


Figura 4-14: Comparação do laço de histerese por frequência de ensaio para a mola tratada a 465ºC e resfriada a água e ensaiada ensaios com temperatura de 49ºC. (a): Tempo de tratamento de 30 minutos, (b): Tempo de tratamento de 60 minutos

Em seguida, temos na figura 4-15 a comparação da quantidade de energia dissipada pelas molas no ensaio com temperatura de 49ºC.

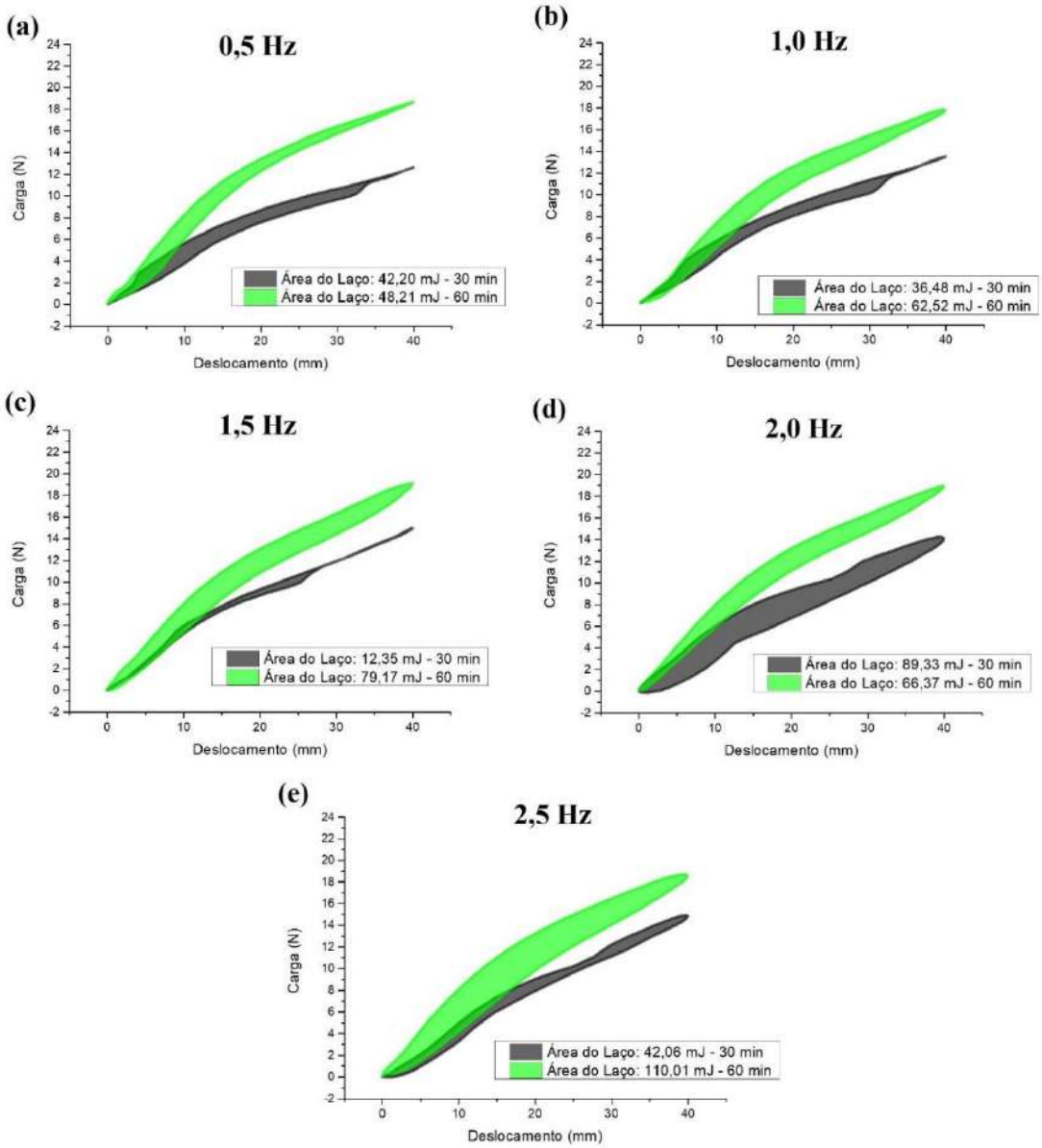


Figura 4-15: Comparação da área do laço de histerese em relação da frequência de ensaio para mola a tratada a 465ºC por 30 min (Cinza) e 60 min (Azul) e ensaiada com temperatura de 49ºC. (a): 0,5Hz (b): 1,0Hz (c): 1,5Hz (d): 2,0Hz (e): 2,5Hz.

Para o ensaio com temperatura de 49ºC observa-se novamente que a mola ensaiada por 30 minutos teve uma média de energia dissipada menor que a mola ensaiada a 60 min onde, com valores respectivamente 44,48 mJ e 73,25 mJ, mostrou um aumento de 64,67%.

Mais uma vez, é feita uma comparação da variação da energia dissipada pelas molas em casa caso observado. A tabela 4-6 apresenta a comparação juntamente da representação gráfica na figura 4-16.

Tabela 4-6: Variação percentual da dissipação de energia para ensaio com temperatura de 49ºC.

Tempo	Frequência	0,5 Hz	1,0 Hz	1,5 Hz	2,0 Hz	2,5 Hz
30 min	Energia Dissipada (mJ)	42,20	36,48	12,35	89,33	42,06
	Variação (%)	0,00%	-13,55%	-70,73%	111,68%	-0,33%
			0,00%	-66,15%	144,87%	15,30%
				0,00%	623,32%	240,57%
					0,00%	-52,92%
60 Min	Energia Dissipada (mJ)	48,21	62,52	79,17	66,36	110,01
	Variação (%)	0,00%	29,68%	64,22%	37,65%	128,19%
			0,00%	26,63%	6,14%	75,96%
				0,00%	-16,18%	38,95%
					0,00%	65,78%

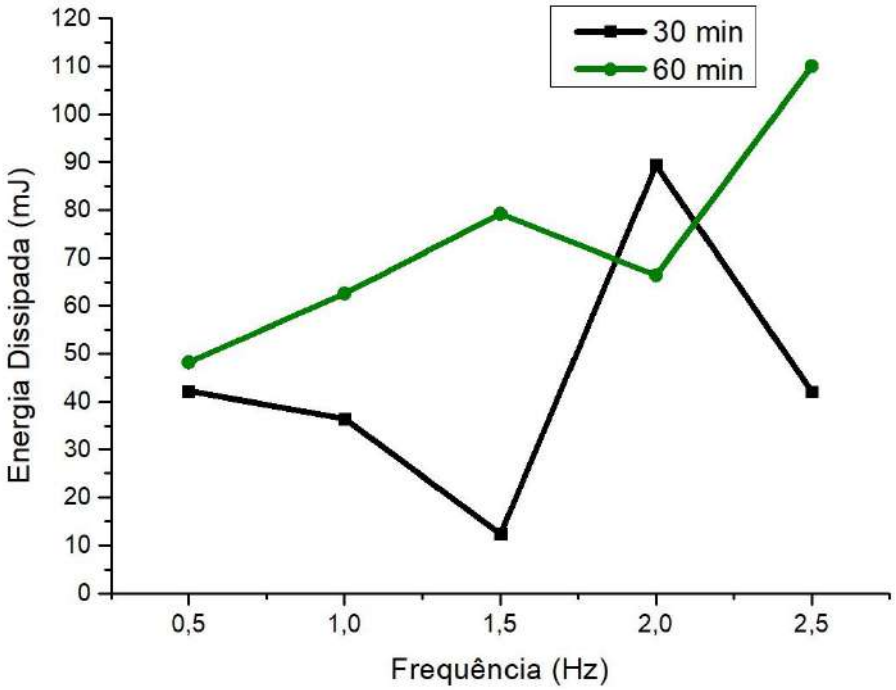


Figura 4-16: Comparação da energia dissipada a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio com temperatura de 49ºC.

Neste caso, é possível observar pela tabela 4-6 que, a mola tratada por 60 minutos mostrou valores maiores de energia dissipada em todos com caso com exceção do ensaio a 2,0 Hz de frequência onde a mola tratada por 30 minutos apresentou um valor maior que também foi o maior entre todos os ensaios desta mesma mola com 89,33 mJ enquanto para a mola tratada por 60 minutos o maior resultado aconteceu a 2,5 Hz de frequência com 110,01 mJ.

Por fim, temos a apresentação da comparação entre os gráficos de histerese para os ensaios realizados com temperatura aplicada de 78ºC para a mola tratada 465ºC, por 30 e 60 minutos e resfriada em água. A comparação é apresentada na figura 4-17.

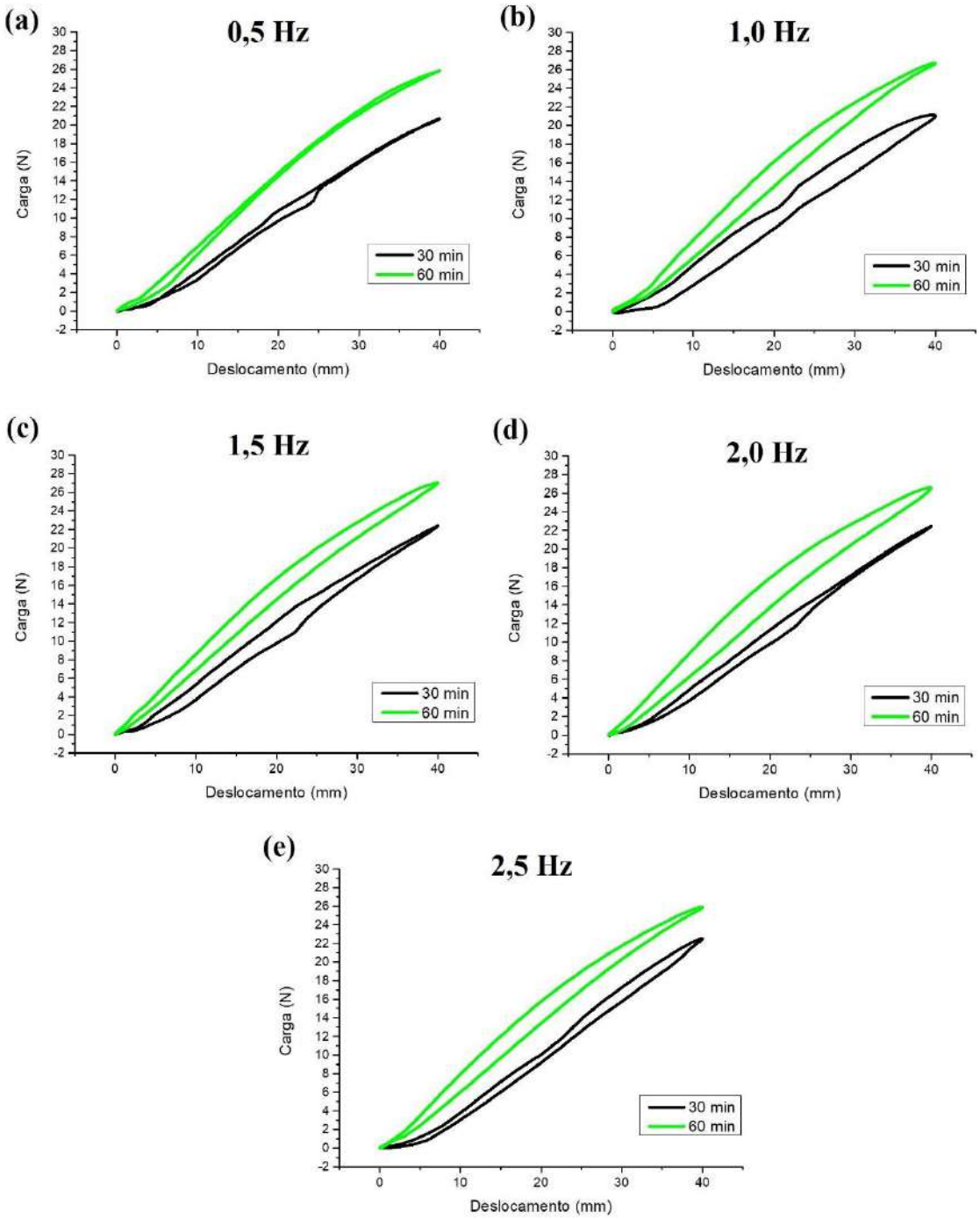


Figura 4-17: Comparação dos laços de histerese com temperatura de 78ºC (a): Frequência de 0,5Hz, (b): Frequência de 1,0Hz, (c) Frequência de 1,5Hz, (d) Frequência de 2,0Hz, (e): Frequência de 2,5Hz.

Novamente, nota-se que a mola tratada por 60 minutos apresentou respostas de força maiores e novamente com uma rigidez no ponto de maior tensão maior em relação a mola tratada por 30 minutos. Assim, apresenta-se novamente uma comparação entre as diferenças percentuais entre cada caso para as molas ensaiadas. A tabela 4-7 apresenta a comparação juntamente da representação gráfica na figura 4-18.

Tabela 4-7: Variação percentual da rigidez das molas para ensaio com temperatura de 78ºC.

Tempo	Frequência	0,5 Hz	1,0 Hz	1,5 Hz	2,0 Hz	2,5 Hz
30 min	Rigidez da Mola (N/mm)	0,5170	0,5263	0,5600	0,5618	0,5625
	Variação (%)	0,00%	1,79%	8,32%	8,66%	8,80%
			0,00%	6,41%	6,75%	6,89%
				0,00%	0,31%	0,45%
					0,00%	0,13%
60 Min	Rigidez da Mola (N/mm)	0,6460	0,6673	0,6760	0,6645	0,6470
	Variação (%)	0,00%	3,29%	4,65%	2,86%	0,15%
			0,00%	1,31%	-0,41%	-3,03%
				0,00%	-1,70%	-4,29%
					0,00%	-2,63%

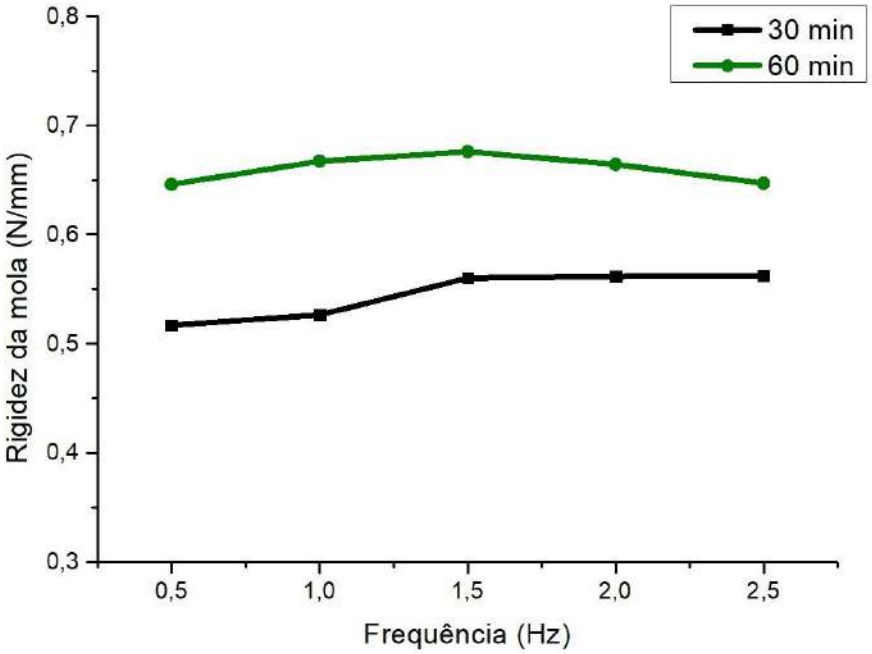


Figura 4-18: Comparação da rigidez a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água para ensaio com temperatura de 78ºC.

Para a maior corrente utilizada nos ensaios feitos neste trabalho, observa-se que a diferença entre o valor da rigidez no ponto de maior tensão da mola tornou-se ainda menor em relação as análises anteriores. Este fator mostra que, quanto maior a temperatura de ensaio, menor será a influência da frequência na rigidez apresentava pelas molas uma vez que, em temperaturas mais elevadas, o calor gerado pela transformação de fase durante os ciclos mecânicos será desprezível.

A figura 4-19 mostra novamente uma comparação entre os laços de histerese por frequência para o ensaio com 78ºC de temperatura de ensaio.

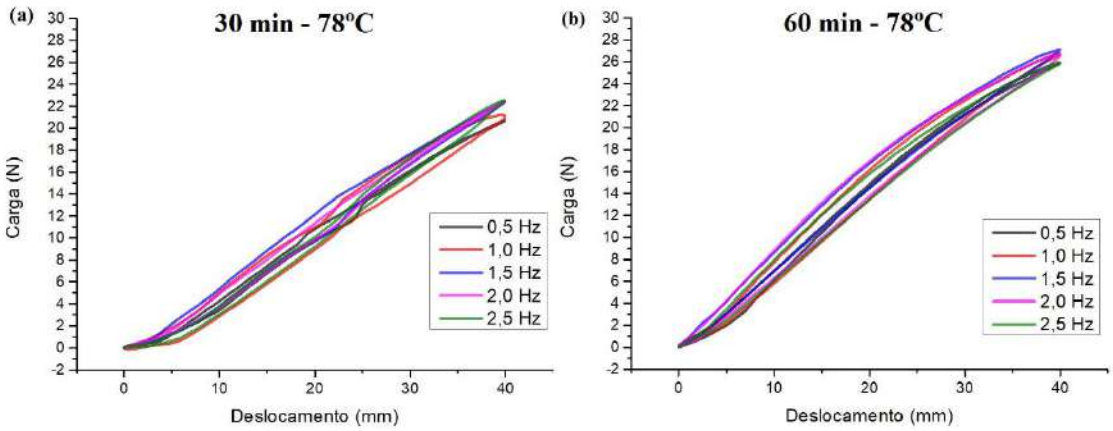


Figura 4-19: Comparação do laço de histerese por frequência de ensaio para a mola tratada a 465ºC e resfriada a água e ensaiada com temperatura de 78ºC. (a): Tempo de tratamento de 30 minutos, (b): Tempo de tratamento de 60 minutos

Por fim, temos na figura 4-20 a última comparação feita entre a quantidade de energia dissipada pelas molas no ensaio com 78ºC de temperatura de ensaio. Neste caso, observa-se que a quantidade de energia dissipada entre as molas se aproximou nas frequências mais baixas se tornando maior nas duas últimas.

Novamente, apresenta-se a diferença percentual entre cada caso na tabela 4-8 juntamente da representação gráfica na figura 4-21.

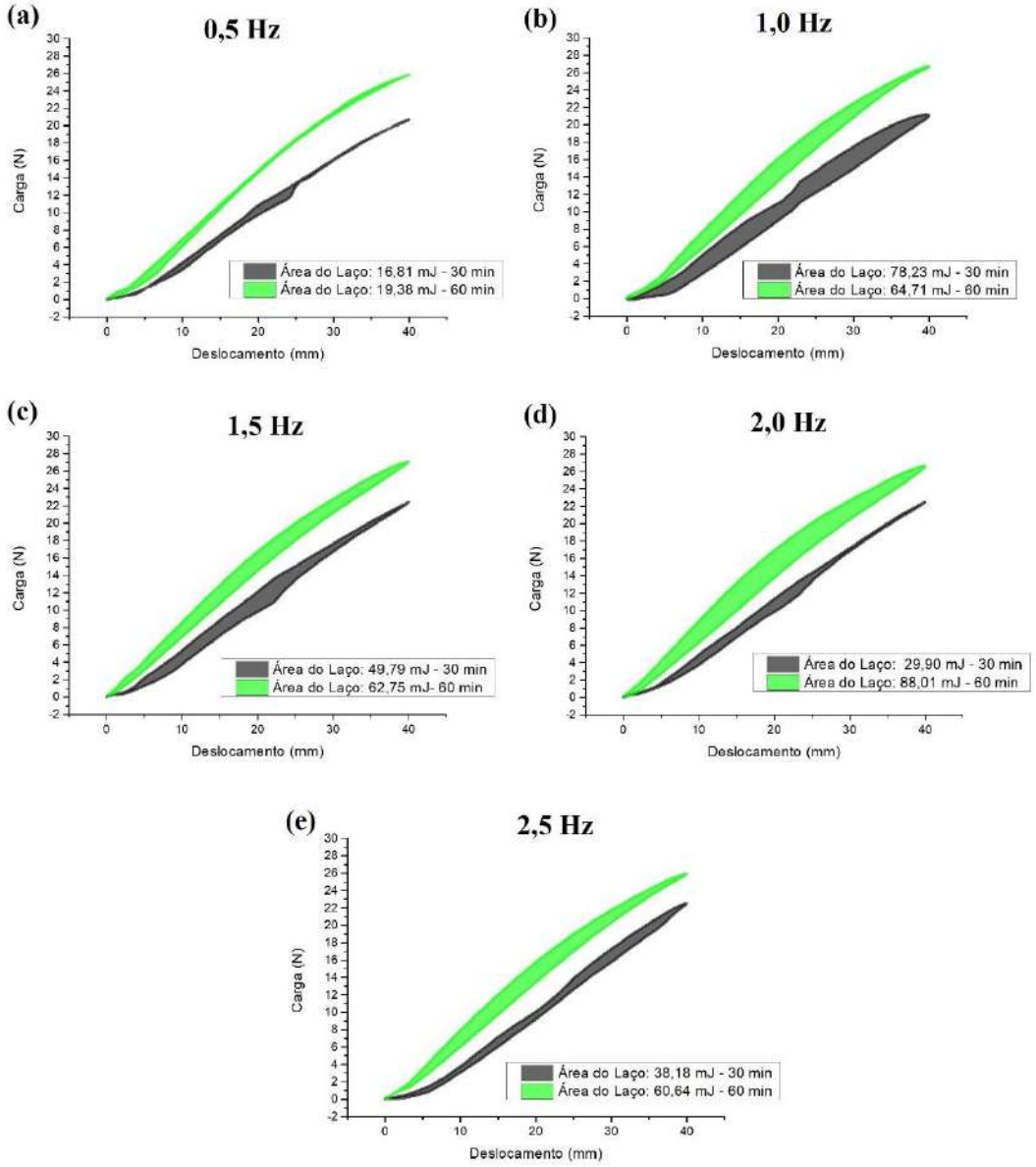


Figura 4-20: Comparação da área do laço de histerese em relação da frequência de ensaio para mola a tratada a 465ºC por 30 min (Cinza) e 60 min (Azul) e ensaiada temperatura de 78ºC. (a): 0,5Hz (b): 1,0Hz (c): 1,5Hz (d): 2,0Hz (e): 2,5Hz.

Tabela 4-8: Variação percentual da dissipação de energia para ensaio com temperatura de 78ºC.

Tempo	Frequência	0,5 Hz	1,0 Hz	1,5 Hz	2,0 Hz	2,5 Hz
30 min	Energia Dissipada (mJ)	16,81	78,23	49,79	29,90	38,18
	Variação (%)	0,00%	365,38%	196,19%	77,87%	127,13%
			0,00%	-36,35%	-61,78%	-51,20%
				0,00%	-39,95%	-23,32%
					0,00%	27,69%
60 Min	Energia Dissipada (mJ)	19,38	64,71	62,75	88,01	60,64
	Variação (%)	0,00%	-6,79%	43,67%	44,92%	-40,63%
			0,00%	54,14%	55,46%	-36,31%
				0,00%	0,86%	-58,68%
					0,00%	-59,03%

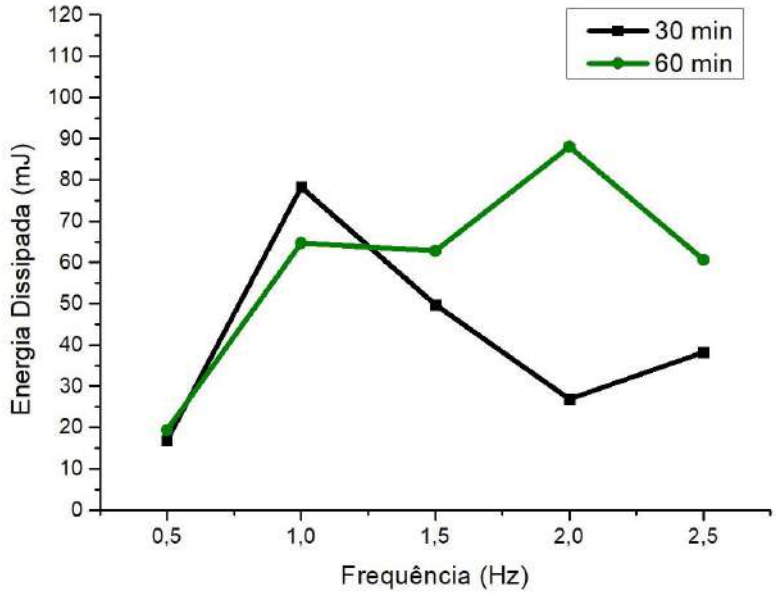


Figura 4-21: Comparação da energia dissipada a cada frequência da mola tratada a 465ºC por 30 e 60 minutos, resfriada em água ensaiada com temperatura de 78ºC.

Neste caso, a mola tratada por 30 minutos apresentou uma média de energia dissipada de 42,58 mJ com o maior valor encontrado no ensaio de 1,0 Hz de frequência enquanto a mola tratada por 60 minutos deve uma média de 59,09 mJ com o maior valor em 2,0 Hz de frequência.

Neste último caso, observa-se uma redução da diferença da média entre as duas molas, caindo de 63,28% e 64,67% referentes aos dois casos anteriores para 38,79% de aumento da mola tratada por 30 minutos para a tratada por 60 minutos. Esta ocorrência pode ser explicada pela relação entre as temperaturas de transformação austenítica e a temperatura de ensaio onde, para temperaturas de ensaio muito acima das temperaturas de transformação existe a possibilidade de ocorrer uma transformação incompleta da mola durante os ciclos mecânicos.

Isso ocorre pois, durante a alteração dos limites de transformação derivado da tensão aplicada, uma liga pseudo-elástica transita entre as fases austenítica e de martensíta demaclada uma vez que, ao aplicar um esforço mecânico, as temperaturas limites de transformação superam a temperatura atual da liga levando a transformação de fase enquanto sobre tensão. Porém, em casos em que a temperatura da mola, mesmo com a tensão aplicada a mesma, continua acima da temperatura de final de transformação A_f ou entre as temperaturas de início e final A_s e A_f, a transformação de fase não acontece por completo o que resulta em uma redução da quantidade de média energia dissipada.

Essas tendências podem ser observadas em outros casos como mostrado na tabela 4-9 onde, se tem marcado em azul as médias apresentadas anteriormente e em amarelo os casos em que ocorreu essas reduções da média em relação a temperatura de ensaio.

Tabela 4-9: Valores médios de energia dissipada.

Temperatura de Tratamento	Resfriamento	Comparação de média de energia dissipada (mJ)					
		30 minutos			60 minutos		
		Corrente aplicada			Corrente aplicada		
		25ºC	49ºC	78ºC	25ºC	49ºC	78ºC
465ºC	Água	26,56	44,48	42,71	43,37	77,89	59,10
	Ar	45,68	38,54	71,87	21,00	30,89	71,61
	Forno	19,75	23,48	77,50	44,17	34,98	70,67
490ºC	Água	43,77	86,30	53,46	27,29	30,15	24,98
	Ar	37,54	49,51	55,62	22,36	55,10	91,32
	Forno	29,02	43,47	95,21	18,88	47,28	39,48
540ºC	Água	46,52	54,27	33,91	22,86	42,95	44,01
	Ar	15,09	36,14	33,94	5,15	20,69	31,24
	Forno	48,53	41,82	46,85	22,48	79,48	56,83

A partir deste ponto, visto que os ensaios realizados resultaram em uma grande quantidade de dados a serem analisados e visando facilitar essa análise, as médias apresentadas serão utilizadas para as análises futuras. Essas médias foram feitas para que os valores trabalhados estejam dentro de uma faixa de energia dissipada, ou seja, entre o menor e o maior valor individual de cada mola. Os valores individuais serão apresentados mais à frente no capítulo durante a análise feita pelo método de Taguchi. Todos os gráficos com os valores individuais de energia podem também ser encontrados no ANEXO I.

Da mesma forma que a variação de frequência, a variação da temperatura foi outro parâmetro importante utilizado para este estudo. Ensaiando cada amostra com diferentes correntes foi possível observar variações consideráveis no laço de histerese e variações significativos no valor da tensão máxima de resposta das molas, por consequência, variações na rigidez da mola.

Ao se trabalhar com molas de liga com memória de forma é importante ter atenção ao fato de que estas ligas têm por característica a mudança de fase quando submetidas a um tratamento termodinâmico e sendo assim, o valor da rigidez de uma mola com memória de forma é variável ao longo de um ciclo térmico, mecânico ou termomecânico.

Quando em trabalho mecânico, as tensões internas no fio da mola variam ao longo do diâmetro do fio sendo zero na linha neutra. Essa variação também afeta a

transformação por tensão da liga fazendo com que, durante um mesmo instante durante um ciclo de carregamento, fases diferentes possam ser encontradas ao longo do diâmetro do fio. Esse comportamento é extremamente importante pois a rigidez da mola irá depender diretamente da quantidade de cada fase que estará presente no fio da mola. (HEIDARI *et al.*, 2016; AGUIAR, 2011).

Neste estudo trabalhou-se com um deslocamento prescrito de 40 mm e sendo assim as análises serão focadas na rigidez no ponto de maior tensão, isso é, quando o deslocamento for máximo buscando simplificar as análises.

Utilizando-se o valor de tensão sempre no ponto de maior deslocamento (40 mm) retirou-se os valores da rigidez os quais foram utilizados neste estudo. E dá mesma forma as médias da rigidez foram calculadas e apresentadas na tabela 4-10.

Tabela 4-10: Valores médios de constante de mola

Temperatura de Tratamento	Resfriamento	Comparação de média da rigidez (N/mm)					
		30 minutos			60 minutos		
		Corrente aplicada no ensaio			Corrente aplicada no ensaio		
		25ºC	49ºC	78ºC	25ºC	49ºC	78ºC
465ºC	Água	0,16	0,35	0,55	0,24	0,48	0,66
	Ar	0,27	0,42	0,62	0,10	0,35	0,62
	Forno	0,18	0,39	0,65	0,14	0,37	0,59
490ºC	Água	0,26	0,46	0,65	0,22	0,47	0,59
	Ar	0,21	0,47	0,64	0,12	0,37	0,52
	Forno	0,15	0,39	0,61	0,14	0,36	0,56
540ºC	Água	0,23	0,39	0,51	0,18	0,35	0,46
	Ar	0,22	0,39	0,52	0,15	0,29	0,44
	Forno	0,14	0,35	0,54	0,14	0,31	0,53

4.3. Análise de dados

Nesta sessão será realizada a análise dos dados cujos ensaios utilizaram o método apresentado por Taguchi com o conceito de ruído e projeto robusto (Montgomery, 2012). Este método irá simplificar a grande quantidade de dados obtidos nos muitos ensaios realizados. O método será aplicado de forma simplificada com o objetivo de apenas organizar os resultados encontrados. Desta forma será possível observar a influência de

cada parâmetro de fabricação sobre o comportamento das molas, e tornar possível entender quais parâmetros apresentaram uma maior relevância nas características da mola.

O Método de Taguchi é utilizado pela aplicação de determinados ruídos ao objeto sob análise, isto é, o produto que será fabricado. Sendo assim, para a aplicação deste método na análise dos resultados, será necessário identificar quais variáveis correspondem a qual tipo de ruído. A tabela 4-11 apresenta como as variáveis foram organizadas.

Tabela 4-11: atribuição de variáveis e um tipo de ruído

Ruídos Externos	Variação da frequência
	Variação da temperatura
Ruídos Variacionais	Temperatura de tratamento
	Método de Resfriamento
	Tempo de Tratamento
	Dimensões da Mola
Ruídos Internos	Variações microestruturais

- Os ruídos externos são todas as variáveis provenientes do meio onde está o sistema, neste caso, a variação de frequência de carregamento e a temperatura aplicada nas molas durante os ensaios.
- Os ruídos variacionais que serão os dados que relativos ao processo de fabricação de um produto, neste caso, de cada mola fabricada.
- Os ruídos internos que são características inerentes ao tipo de material do produto. Neste trabalho pelo uso de uma liga de memória de forma para fabricação os ruídos são relativos a variações na microestrutura da liga na mola. Esse último ruído é especialmente importante pois, sabendo-se que existe uma variação de tensão ao longo do diâmetro do fio o que provoca uma variação das fases presentes no fio durante um ciclo de carregamento (HEIDARI *et al.*, 2016; AGUIAR, 2011).

Nesta análise a frequência do carregamento e a corrente/temperatura usada nos ensaios foram utilizados como ruídos externos e aplicados nas molas para montar as matrizes e retirar as médias que foram utilizadas nas análises. É importante lembrar que o método de Taguchi está sendo utilizado para facilitar a análise dos resultados, reduzindo o número de dados separados, montando médias e identificando tendências de comportamento em relação a cada um dos parâmetros de fabricação. Para iniciar a análise, a primeira matriz construída foi a matriz para os valores de energia dissipada obtidos em cada mola (y1 a y5) e a média dos valores obtidos yM. As tabelas 4-12 e 4-13 mostram as matrizes de energia dissipada das molas tratadas por de 30 minutos e 60 minutos respectivamente.

Tabela 4-12: Matrizes de Energia dissipada das molas tratadas por 30 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC.

(a)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	26,85	49,76	14,64	17,77	23,78	26,56
	49ºC	42,19	36,48	12,35	89,33	42,06	44,48
	78ºC	16,81	78,23	49,79	29,90	38,81	42,71
Ar	25ºC	54,17	54,17	31,66	17,23	71,18	45,68
	49ºC	21,58	51,82	70,99	13,59	34,73	38,54
	78ºC	12,71	52,15	57,22	120,36	116,91	71,87
Forno	25ºC	28,56	30,56	23,30	0,96	15,35	19,75
	49ºC	32,46	4,21	35,50	28,52	16,70	23,48
	78ºC	34,41	88,68	48,67	94,49	121,26	77,50

(b)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	6,95	44,95	56,39	47,64	62,92	43,77
	49ºC	94,61	101,87	68,06	85,29	81,68	86,30
	78ºC	48,41	55,06	55,27	32,14	76,43	53,46
Ar	25ºC	38,26	64,40	0,44	59,93	24,69	37,54
	49ºC	72,27	68,85	38,91	25,18	42,36	49,51
	78ºC	92,28	24,21	60,55	57,34	43,72	55,62
Forno	25ºC	48,11	9,59	12,23	54,24	20,95	29,02
	49ºC	10,79	60,17	73,41	34,51	38,46	43,47
	78ºC	70,09	99,11	82,91	124,04	99,89	95,21

(c)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	22,09	28,73	30,77	36,60	114,41	46,52
	49ºC	91,93	53,71	51,10	34,29	40,31	54,27
	78ºC	57,79	55,12	9,93	8,25	38,47	33,91
Ar	25ºC	9,47	6,91	9,77	31,12	18,16	15,09
	49ºC	40,49	66,30	31,65	3,73	38,51	36,14
	78ºC	61,11	41,16	17,78	32,38	17,25	33,94
Forno	25ºC	20,79	65,61	52,63	51,75	51,85	48,53
	49ºC	37,28	69,96	36,92	26,57	38,35	41,82
	78ºC	67,42	19,07	74,08	35,87	37,81	46,85

Tabela 4-13: Matrizes de Energia dissipada das molas tratadas por 60 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC.

(a)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	40,06	37,35	57,57	58,07	23,79	43,37
	49ºC	71,64	62,25	79,17	66,36	110,01	77,89
	78ºC	19,37	64,71	62,75	88,01	60,64	59,10
Ar	25ºC	37,19	23,22	12,32	11,55	20,72	21,00
	49ºC	15,37	17,28	38,82	60,04	22,93	30,89
	78ºC	54,54	64,85	84,44	86,49	67,74	71,61
Forno	25ºC	67,08	40,20	42,56	51,05	19,97	44,17
	49ºC	56,57	24,40	32,19	43,04	18,70	34,98
	78ºC	93,58	74,16	26,68	52,40	106,51	70,67

(b)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	11,97	32,30	34,16	25,66	32,36	27,29
	49ºC	56,53	1,57	18,82	64,79	9,04	30,15
	78ºC	32,63	10,89	11,10	42,99	27,29	24,98
Ar	25ºC	29,16	26,91	12,88	8,21	34,63	22,36
	49ºC	15,31	62,44	81,47	67,78	48,52	55,10
	78ºC	118,10	88,64	66,22	45,25	138,40	91,32
Forno	25ºC	30,38	16,76	8,00	17,92	21,33	18,88
	49ºC	48,16	39,45	48,80	53,15	46,84	47,28
	78ºC	72,97	50,40	38,95	10,36	24,71	39,48

(c)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	7,44	20,85	23,52	31,27	31,22	22,86
	49ºC	48,61	56,04	19,16	41,36	49,58	42,95
	78ºC	55,93	40,76	71,41	29,59	22,38	44,01
Ar	25ºC	6,50	2,21	2,07	1,92	13,04	5,15
	49ºC	29,21	17,91	12,95	4,87	38,51	20,69
	78ºC	46,13	28,92	21,89	48,10	11,18	31,24
Forno	25ºC	16,05	9,69	16,02	33,34	37,29	22,48
	49ºC	69,91	64,25	106,62	103,33	53,28	79,48
	78ºC	67,37	30,59	56,71	49,62	79,85	56,83

Em seguida, é montada a matriz com os valores da rigidez das molas em N/mm, novamente apresentando um valor para cada frequência ensaiada e o valor médio para

cada mola. As tabelas 4-14 e 4-15 apresentam as matrizes em relação aos tempos de tratamento de 30 e 60 minutos respectivamente.

Tabela 4-14: Matrizes da rigidez das molas tratadas por 30 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC.

(a)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	0,13625	0,13725	0,17425	0,17375	0,17650	0,16
	49ºC	0,31575	0,33750	0,37375	0,35150	0,37075	0,35
	78ºC	0,51700	0,52625	0,56000	0,56175	0,56250	0,55
Ar	25ºC	0,24500	0,24000	0,28250	0,29200	0,28500	0,27
	49ºC	0,40375	0,30025	0,45675	0,47275	0,48500	0,42
	78ºC	0,53975	0,63350	0,67000	0,59900	0,67100	0,62
Forno	25ºC	0,14925	0,16200	0,17350	0,20425	0,18775	0,18
	49ºC	0,36225	0,29875	0,42175	0,36200	0,50000	0,39
	78ºC	0,59925	0,58200	0,66125	0,71575	0,68200	0,65

(b)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	0,16700	0,25550	0,25350	0,33150	0,30400	0,26
	49ºC	0,43500	0,44575	0,48975	0,45300	0,45300	0,46
	78ºC	0,62150	0,62950	0,65600	0,67225	0,65250	0,65
Ar	25ºC	0,13375	0,23275	0,19975	0,29350	0,21100	0,21
	49ºC	0,39200	0,45950	0,46275	0,48650	0,52500	0,47
	78ºC	0,60100	0,60475	0,64150	0,67650	0,66225	0,64
Forno	25ºC	0,12350	0,14600	0,15125	0,18850	0,16425	0,15
	49ºC	0,35425	0,37900	0,36075	0,40075	0,44100	0,39
	78ºC	0,60175	0,57500	0,59975	0,59350	0,68500	0,61

(c)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	0,17700	0,21925	0,23425	0,25800	0,25575	0,23
	49ºC	0,37550	0,38550	0,38675	0,40725	0,38950	0,39
	78ºC	0,47150	0,48650	0,58000	0,52125	0,49350	0,51
Ar	25ºC	0,20225	0,20775	0,24375	0,22850	0,23775	0,22
	49ºC	0,34625	0,35650	0,40075	0,46125	0,38100	0,39
	78ºC	0,49750	0,52650	0,54700	0,51100	0,52300	0,52
Forno	25ºC	0,11750	0,11775	0,15375	0,15825	0,15425	0,14
	49ºC	0,28450	0,33950	0,38300	0,37850	0,38025	0,35
	78ºC	0,49625	0,56675	0,51675	0,56775	0,57475	0,54

Tabela 4-15: Matrizes da rigidez das molas tratadas por 60 min. (a) Molas tratadas a 465ºC, (b) Molas tratadas a 490ºC, (c) Molas tratadas a 540ºC

(a)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	0,15850	0,25225	0,27000	0,27875	0,26050	0,24
	49ºC	0,54900	0,44475	0,47675	0,47225	0,46325	0,48
	78ºC	0,64600	0,66725	0,67600	0,66450	0,64700	0,66
Ar	25ºC	0,08775	0,09550	0,10600	0,10050	0,09450	0,10
	49ºC	0,16525	0,18950	0,43025	0,48325	0,47825	0,35
	78ºC	0,57100	0,59100	0,60100	0,67675	0,65200	0,62
Forno	25ºC	0,12475	0,12775	0,13175	0,17425	0,13650	0,14
	49ºC	0,32400	0,34550	0,35750	0,44975	0,38050	0,37
	78ºC	0,53950	0,54750	0,58900	0,65350	0,61050	0,59

(b)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	25ºC	0,16475	0,12750	0,25825	0,27450	0,25225	0,22
	49ºC	0,40775	0,47450	0,47425	0,49525	0,50550	0,47
	78ºC	0,64050	0,56100	0,58725	0,56550	0,57225	0,59
Ar	25ºC	0,09225	0,01510	0,14975	0,16150	0,17200	0,12
	49ºC	0,28525	0,35750	0,37400	0,42450	0,40725	0,37
	78ºC	0,49975	0,51025	0,52575	0,56075	0,52825	0,52
Forno	25ºC	0,10400	0,12450	0,14500	0,18225	0,13850	0,14
	49ºC	0,28025	0,32850	0,36450	0,42000	0,39150	0,36
	78ºC	0,54975	0,57350	0,60100	0,53575	0,53400	0,56

(c)

		y1 = 0,5 Hz	y2= 1,0 Hz	y3 = 1,5 Hz	y4 = 2,0 Hz	y5 = 2,5 Hz	yM
Água	0,0 A	0,11400	0,15875	0,18925	0,22525	0,20100	0,18
	1,5 A	0,30025	0,33900	0,35350	0,39600	0,36500	0,35
	2,5 A	0,45700	0,46675	0,47175	0,45700	0,45500	0,46
Ar	0,0 A	0,12575	0,13275	0,18075	0,15625	0,16425	0,15
	1,5 A	0,25350	0,25825	0,32925	0,29425	0,31100	0,29
	2,5 A	0,41825	0,42775	0,47675	0,43750	0,44025	0,44
Forno	0,0 A	0,13175	0,14225	0,13500	0,15600	0,14575	0,14
	1,5 A	0,25950	0,27675	0,35700	0,31975	0,35500	0,31
	2,5 A	0,51950	0,51350	0,53375	0,53700	0,52525	0,53

Com isso, temos os dados para iniciar o estudo dos resultados dos ensaios experimentais. A análise foi feita inicialmente sobre os resultados de energia dissipada,

depois os resultados de rigidez e ao final realizou-se uma análise geral apresentando conclusões sobre os resultados obtidos. No anexo I são apresentados individualmente os gráficos de cada ensaio realizado.

Na apresentação dos resultados foi utilizada uma codificação para identificar as molas e simplificar a análise dos gráficos obtidos. A correlação com os códigos de identificação é apresentada na tabela 4-16. Assim, com a identificação apresentada podemos iniciar a análise dos gráficos de influência dos parâmetros de fabricação.

Tabela 4-16:Códigos de identificação das molas

Código da Mola	**Método de Resfriamento**	**Temperatura de Tratamento**	**Tempo de Tratamento**
M01-T01	Água	465ºC	30 Minutos
M05-T01	Ar		
M09-T01	Forno		
M13-T01	Água	490ºC	
M17-T01	Ar		
M21-T01	Forno		
M25-T01	Água	540ºC	
M29-T01	Ar		
M33-T01	Forno		
M01-T02	Água	465ºC	60 Minutos
M05-T02	Ar		
M09-T02	Forno		
M13-T02	Água	490ºC	
M17-T02	Ar		
M21-T02	Forno		
M25-T02	Água	540ºC	
M29-T02	Ar		
M33-T02	Forno		

Na tabela 4-17 é apresentado o tipo de comportamento que foi observado em cada mola ensaiada por Duarte (2019), como forma de auxiliar o entendimento dos resultados obtidos neste estudo.

Tabela 4-17: Indicação do tipo de comportamento apresentado pela molas ensaiadas por Duarte (2019).

Mola	Comportamento da mola
M01 -T01	Pseudo-Elástico
M05 - T01	Memória de Forma / Deformação Residual de 17,5 mm
M09 - T01	Pseudo-Elástico
M13 - T01	Pseudo-Elástico
M17 - T01	Pseudo-Elástico
M21 - T01	Memória de Forma / Deformação Residual de 18,5 mm
M25 - T01	Pseudo-Elástico
M29 - T01	Pseudo-Elástico
M33 - T01	Memória de Forma / Deformação Residual de 30 mm
M01 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 13 mm
M05 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 22 mm
M09 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 27,5 mm
M13 - T02	Pseudo-elástico
M17 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 25 mm
M21 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 28 mm
M25 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 35,5 mm
M29 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 32 mm
M33 - T02	Memória de Forma / Deformação Residual de 32,5 mm

Por fim, antes de se iniciar a análise dos resultados será apresentado como serão referidas as partes da seção transversal do fio em relação a fase presente. Sabe-se que as tensões no fio variam ao longo do diâmetro da seção transversal do fio e essa variação leva a ocorrência de diversas fases presentes em um mesmo instante. Sendo assim será adotada a seguinte nomenclatura para se referir a cada porção do mesmo:

A seção (1) será a área próxima à linha neutra onde as tensões lineares e próximas a zero, a seção (2) é a área intermediária onde as tensões serão suficientes para iniciar a transformação de fase, mas insuficientes para a transformação total, e por fim, a seção (3) será a área próxima à superfície do fio onde as tensões serão maiores e suficientes em alguns casos para uma transformação total entre a fase austenítica e a martensita demaclada ou, em alguns caso, entre a fase austenítica e a fase R (GÉDOUIN, 2019). A figura 4-22 mostra um esquema dessa divisão.

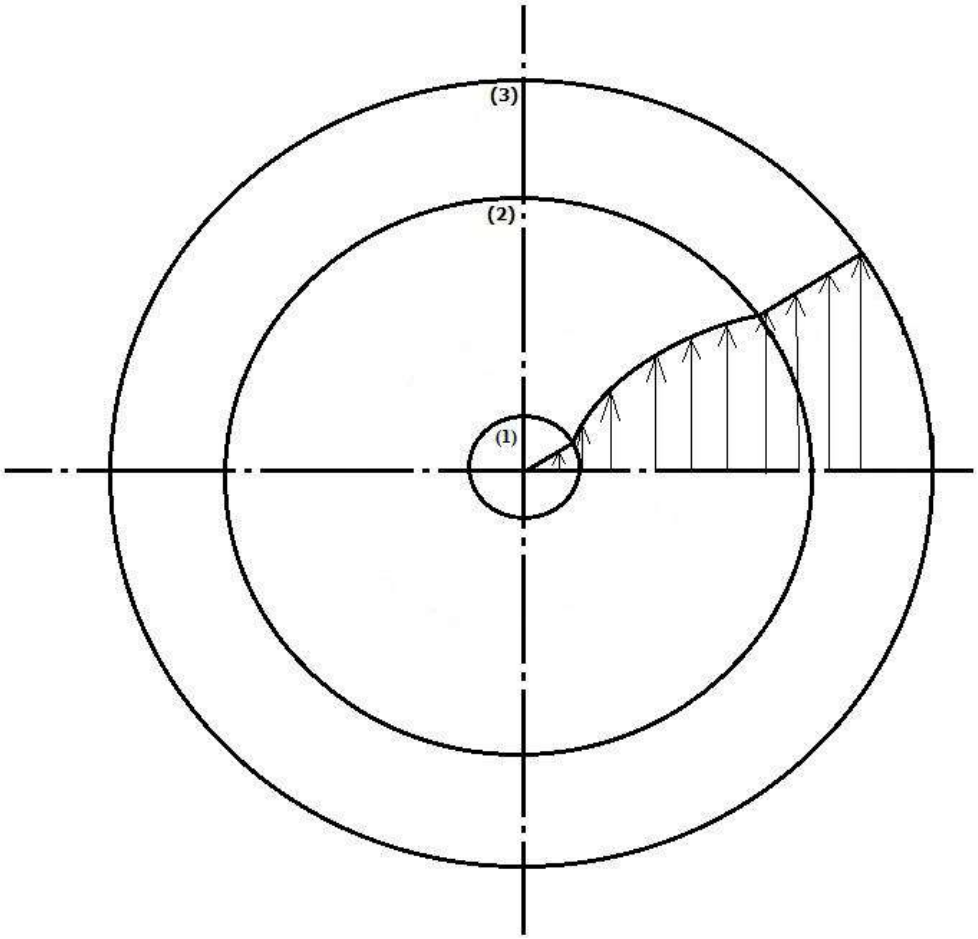


Figura 4-22: Área de transformação de fase de acordo com a transformação de fase. Seção (1): Sem transformação de fase; Seção (2): Transformação incompleta, presença de fases intermediárias; Seção (3): Transformação de fase completa.

4.3.1. Análise dos resultados

Para analisar os resultados encontrados, será apresentado primeiro uma comparação macro dos dados obtidos para se ter uma visão geral de como cada mola se comportou em relação as demais, lembrando que serão utilizados os valores das médias entre das cinco frequências feitas utilizando o método de Taguchi. Conforme a análise prosseguir, serão apresentados gráficos focados em um determinado parâmetro para auxiliar o entendimento de certos comportamentos. Inicialmente, a figura 4-23 apresenta os resultados de todas as molas tratadas por 30 minutos.

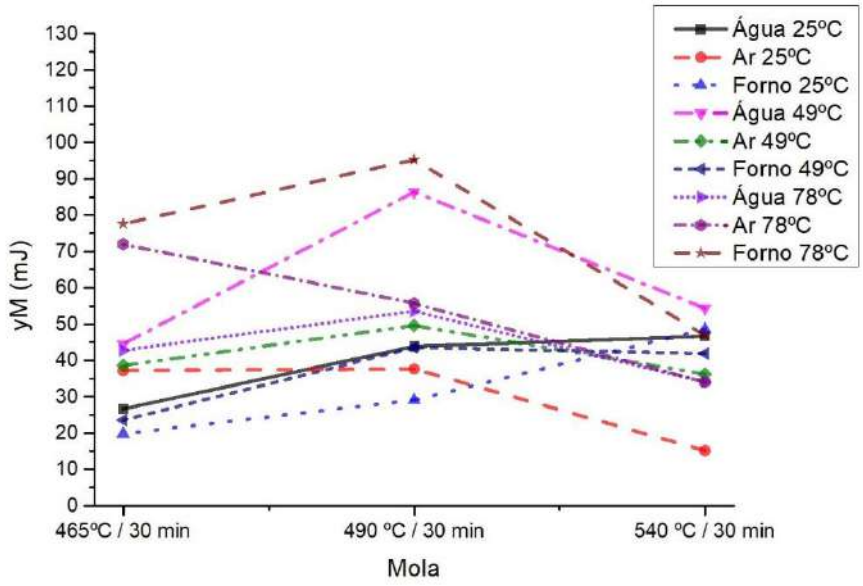


Figura 4-23: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 30 minutos.

Analisando-se os resultados apresentados na figura 4-23, pode-se observar que, os valores de dissipação de energia, quando comparados para um determinado método de resfriamento, nota-se que a temperatura de 490ºC apresentou, de modo geral, os maiores valores de dissipação de energia. Observou-se ainda que, no ensaio em temperatura ambiente, a mola tratada a 490ºC e resfriada em água, apesar de não ter apresentado o maior resultado de dissipação de energia, o valor obtido de 43,77 mJ foi muito semelhante ao apresentado pela mola tratada a 540ºC de 46,52 mJ que foi o maior valor encontrado

em questão, uma diferença de 5,91%. Dá mesma maneira, para as molas resfriadas ao ar, nos ensaios em temperatura ambiente observa-se que as molas tratadas a 465ºC e 490ºC tiveram valores de dissipação de energia de 37,15 mJ e 37,54 mJ respectivamente uma diferença de 1,06%, enquanto que para os ensaios a 49ºC e para os ensaios com 78ºC os maiores valores foram com 490ºC e 465ºC de temperatura de tratamento respectivamente.

Por fim, para as molas resfriadas no forno, observou-se que a mola tratada a 540ºC apresentou o maior valor de dissipação em temperatura ambiente, sendo o maior valor isolado, enquanto no ensaio com temperatura de 49ºC as molas tratadas a 490ºC e 540ºC se apresentaram valores de dissipação semelhantes com a mola tratada a 490ºC sendo levemente superior com 43,47 mJ de energia dissipada para 41,81 mJ da mola tratada a 540ºC, 3,95% de diferença. Para o ensaio com 78ºC a mola tratada a 490ºC passou a ser o maior valor com a mola tratada a 540 ºC caindo para o menor valor.

Com isso, entende-se que, as molas tratadas por 30 minutos a 490ºC apresentaram uma tendência a terem o maior valor de dissipação, apresentando valores isoladamente superiores ou iguais aos maiores valores de dissipação de energia em sete dos nove casos apresentados. Para se observar melhor estes resultados, a figura 4-24 apresenta uma comparação isolada para cada método de resfriamento.

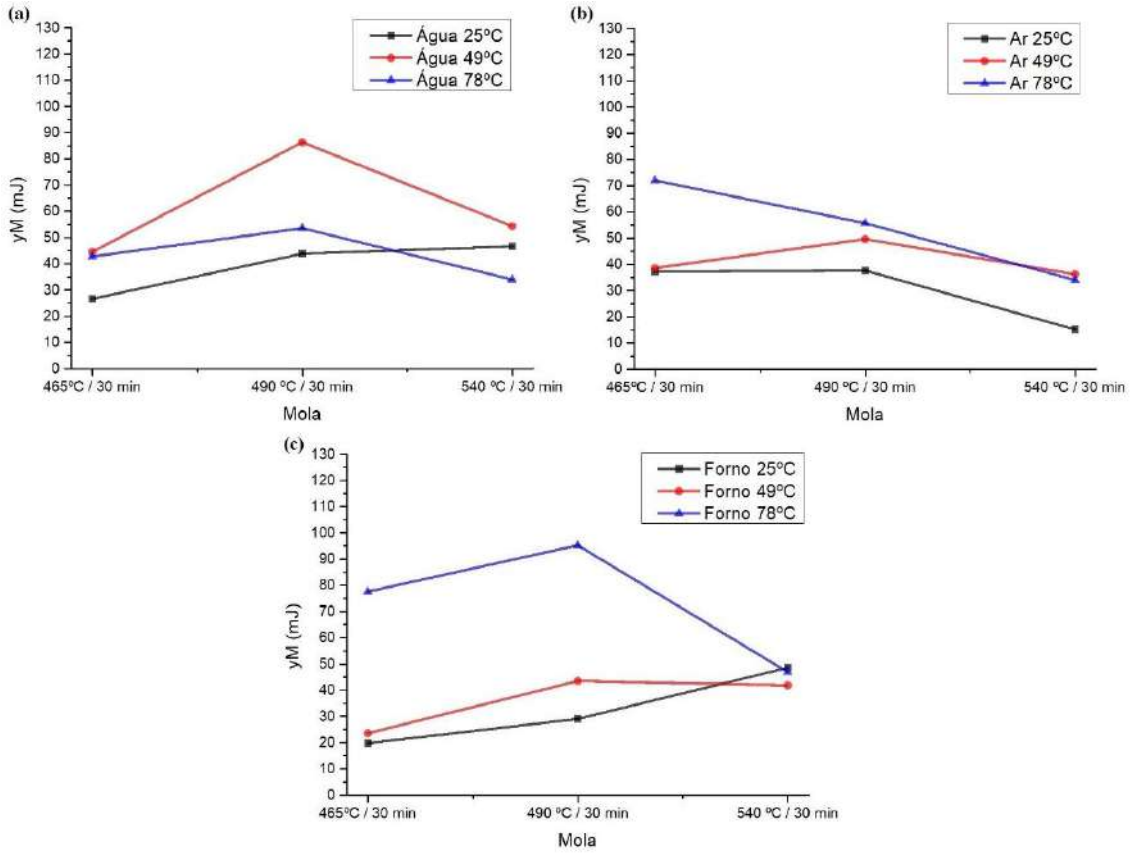


Figura 4-24: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 30 minutos em função do método de resfriamento utilizado. (a): Molas resfriadas em água, (b): Molas resfriadas ao ar, (c): Molas resfriadas no forno.

Na figura 4-24 observa-se que, como dito anteriormente, as molas tratadas a 490ºC apresentaram de modo geral valores maiores de dissipação de energia ao longo de todas as temperaturas de ensaio, tendo valores de dissipação maiores ou muito próximos dos maiores em 7 dos 9 casos, sendo inferior apenas em relação a mola resfriada ao ar e tratada a 465ºC no ensaio a 78ºC e em a mola resfriada no forno e tratada a 540ºC no ensaio em temperatura ambiente (25ºC) onde, em ambos os casos, a quantidade de energia dissipada é claramente maior nestas molas em relação a tendência observada.

Além disso, pela análise do comparativo feito na figura 4-24, nota-se que o método de resfriamento teve, de modo geral, uma influência em relação a quantidade de energia dissipada pela mola com o quão maior a temperatura de ensaio. Observa-se que, para as molas resfriadas em água, o trabalho em uma temperatura acima da temperatura

ambiente mostrou-se eficiente para atingir valores maiores de dissipação, porém apenas até a temperatura de 49ºC, pois após estes observou-se uma queda na quantidade de energia dissipada no ensaio com 78ºC de temperatura. Por outro lado, para as molas resfriadas ao ar e no forno a temperatura de ensaio levou a valores progressivamente maiores sendo notável no caso das molas resfriadas no forno onde no ensaio com 78ºC de temperatura os resultados obtidos tiveram diferenças significativas para as temperaturas mais baixas em duas das 3 molas ensaiadas. Por fim, temos a figura 4-25 onde se mostra a evolução em relação a cada temperatura de tratamento para as molas tratadas por 30 minutos e separados por cada corrente utilizada.

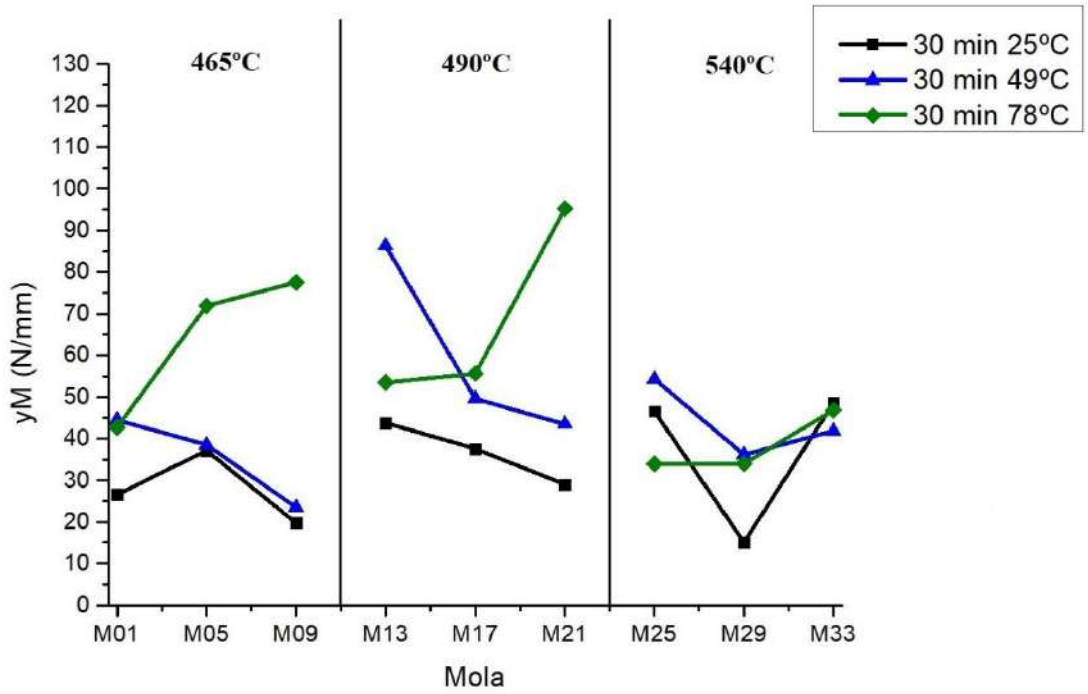


Figura 4-25: Comparação da energia dissipada pelas molas em cada temperatura de tratamento para o tempo de tratamento de 30 minutos.

Observando-se agora as molas tratadas por 60 minutos, apresenta-se na figura 4-26 a comparação geral dos resultados para este tempo de tratamento.

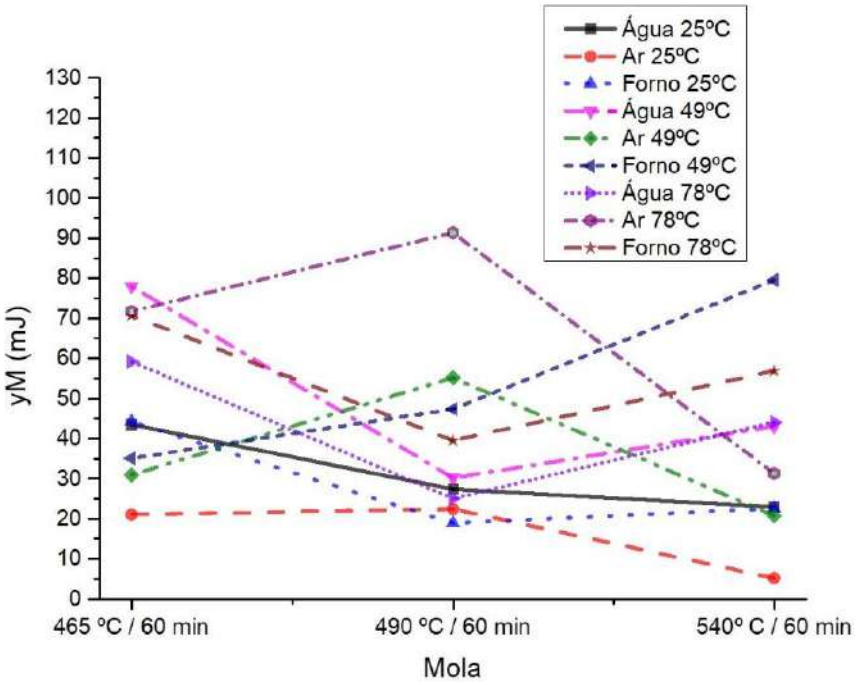


Figura 4-26: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 60 minutos.

Observando a figura 4-26, nota-se que neste caso, as molas tratadas a 465ºC tiveram de modo geral valores melhores de dissipação de energia. Para as molas resfriadas em água, a mola tratada a 465ºC teve valores maiores em todas as temperaturas de ensaio. Para as molas resfriadas ao ar observa-se que as molas tratadas a 490ºC apresentaram os maiores valores de dissipação para todas as temperaturas de ensaio, porém, sendo muito semelhante a mola tratada a 465ºC no ensaio em temperatura ambiente. Neste caso com 21 mJ de energia dissipada para a mola tratada a 465ºC e 22,36 mJ para a mola tratada a 490ºC, uma diferença de 6,07%. Por fim, entre as molas resfriadas no forno, as molas tratadas a 465ºC apresentaram novamente valores de dissipação de energia maiores nos ensaios em temperatura ambiente e para os ensaios temperatura de 78ºC. Entretanto, para o ensaio a 49ºC a mola tratada a 540ºC e resfriada no forno apresentou a maior dissipação.

Observa-se que entre as molas tratadas por 60 minutos ocorre uma maior dissipação de energia para as molas tratadas a 465ºC. Estas molas apresentaram os maiores valores de dissipação de energia na maioria dos ensaios em temperatura ambiente e a 78ºC. Ao mesmo tempo, para o ensaio com temperatura de 49ºC, a mola tratada a 490ºC apresentou valores melhores na dissipação de energia.

Para auxiliar a análise destes resultados, apresenta-se novamente na figura 4-27 uma comparação isolada para cada método de resfriamento das molas tratadas por 60 minutos.

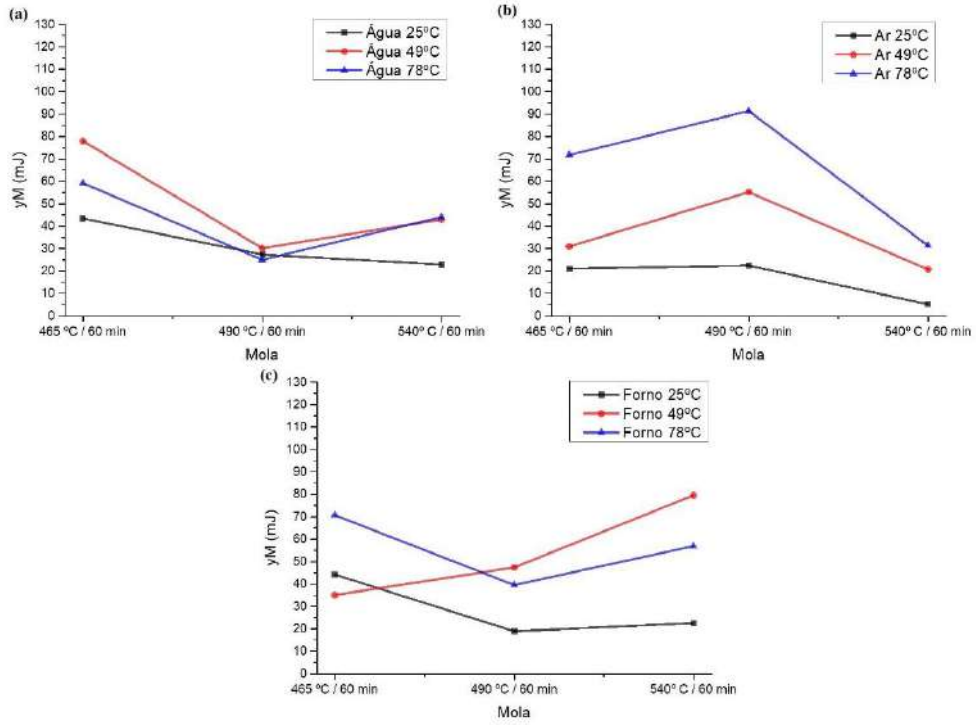


Figura 4-27: Comparação da energia dissipada pelas molas tratadas por 60 minutos em função do método de resfriamento utilizado. (a): Molas resfriadas em água, (b): Molas resfriadas ao ar, (c): Molas resfriadas no forno.

Observa-se pela figura 4-27 que, as molas resfriadas ao ar tiveram o maior aproveitamento da variação da temperatura de trabalho. Para entender o motivo deste comportamento considera-se a temperatura de início da transformação para fase R, Rs, em cada mola em questão. Novamente, observando-se os ensaios de DSC nota-se que, para as molas resfriadas em água a temperatura de Rs esteve sempre abaixo da temperatura ambiente sendo o caso mais próximo na mola tratada a 540ºC com a temperatura Rs de 23,29ºC. Essa proximidade implica que, durante a transformação de fase causada pelo ciclo mecânico a mola fará ciclos entre a fase austenítica e a fase R pelo deslocamento dos limites de transformação, o que levaria a uma redução da dissipação de energia.

Em relação ao demais métodos de resfriamento, observa-se que os ensaios 49ºC de temperatura de ensaio apresentaram valores maiores em 2 dos 3 casos para as molas

resfriadas em água e novamente em 2 dos 3 casos para as molas resfriadas no forno. Adicionalmente, pode-se observar mais claramente a tendência descrita anteriormente onde as molas tratadas a 465ºC, que tiveram os melhores resultados no geral sendo maiores em 5 dos 9 casos. Para o caso do ensaio em temperatura ambiente das molas resfriadas ao ar, teve a dissipação muito semelhante ao maior valor apresentado pela mola resfriada a 490ºC.

Novamente apresenta-se na figura 4-28 o onde se mostra a evolução em relação a cada temperatura de tratamento nas molas tratadas por 60 minutos, separados por cada corrente utilizada.

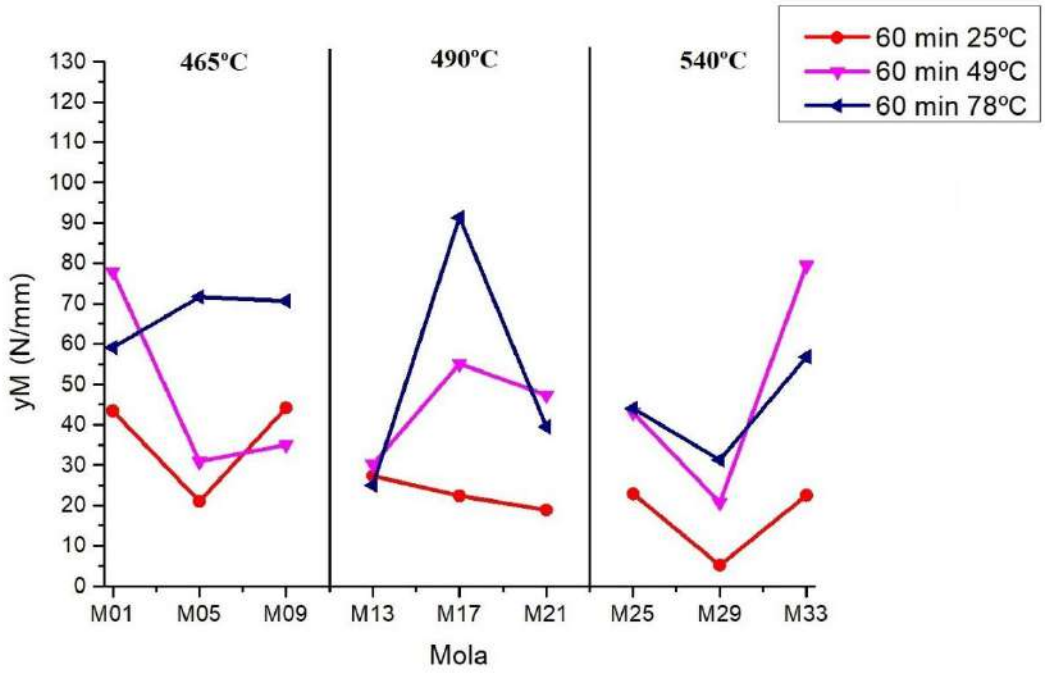


Figura 4-28: Comparação da energia dissipada pelas molas em cada temperatura de tratamento para o tempo de tratamento de 60 minutos.

No estudo de Frick *et. al.* em 2005 observou-se que a realização do processo de envelhecimento em temperaturas próximas a 400ºC favoreceu a dissipação de energia nas amostras estudadas e a temperatura de envelhecimento afetou as temperaturas de transformação tornando-as maiores tanto quanto maior a temperatura do tratamento. As molas com maiores valores de Af implica que a possibilidade de estas apresentarem um comportamento de memória de forma convencional em temperatura ambiente é maior e,

dependendo da situação torna-as mais susceptíveis a transformações espontâneas quando em temperatura ambiente. Neste estudo os resultados se mostraram próximos a constatação de Frick onde se observou que os maiores valores de dissipação de energia, em sua maioria, foram para a menor temperatura de ensaio entre as molas tratadas por 30 minutos e na temperatura intermediária para as molas tratadas por 60 minutos. Em ambos os casos com alguns casos isolados diferindo da tendência.

Em 2017, foi observado por Fan *et al.* que tratamentos realizados em temperaturas mais próximas a temperatura de solubilização de 670ºC aumentam a taxa de absorção da liga, o que aumenta concentração de Ni na liga e reduz a quantidade de precipitados. Sendo assim, apesar das molas tratadas em temperaturas mais altas e por mais tempo apresentarem comportamento de memória de forma convencional, a maior proximidade com a temperatura de solubilização pode levar a uma redução da quantidade de precipitados, que tem um efeito positivo no efeito de memória de forma e por este fato, levaria a uma redução da quantidade de energia dissipada. Estas constatações feitas por Fan também se alinham com o que foi observado na análise anterior onde, os valores da dissipação de energia das molas tratadas a maior temperatura foram em sua maioria inferiores em relação a pelo menos uma das molas tratadas nas demais temperaturas.

Estes resultados apontam que é necessário julgar e encontrar um equilibro entre fatores quando se busca valores elevados de dissipação de energia. Entende-se que, o uso de uma temperatura de trabalho muito elevada pode prejudicar a capacidade de transformação por tensão da mola, mas ao mesmo tempo pode evitar a transformação em fase R por estar mais acima da temperatura de início de transformação Rs. Da mesma forma, o tratamento térmico em temperaturas mais elevadas favorece a fabricação de molas com comportamento de memória de forma clássica e com um número maior de precipitados, resultando a uma boa capacidade de dissipação de energia, entretanto, temperaturas muito próximas a temperatura de solubilização aumentam a absorção e tem o efeito contrário.

Pode-se exemplificar esta situação citando as molas resfriadas ao ar apresentadas na figura 4-26. Pelos ensaios de DSC feitos por Duarte, temos que os valores de Af para as molas apresentadas são de: 36,83ºC, 25,91ºC e 40,18ºC para as molas tratadas a 465ºC, 490ºC e 540ºC respectivamente. Como dito anteriormente, as molas que possuem a

temperatura ambiente entre seus valores de As e Af podem apresentar uma redução da quantidade de energia dissipada pois, para cada ciclo mecânico estas não passam por um processo de transformação completa, prejudicando a dissipação. Adicionalmente, os valores de Rs para as molas tratadas a 465ºC, 490ºC e 540ºC são de 28,65ºC, 19,77ºC e 23,29ºC respectivamente, que são próximos a temperatura ambiente. Por este motivo, observa-se um crescimento na quantidade de energia dissipada com o aumento da temperatura de ensaio, indicando que a quantidade de Fase R presente durante a transformação foi menor em relação aos ensaios com temperatura ambiente. Seguindo com as análises dos resultados encontrados, agora serão apresentados e brevemente discutidos os resultados sobre a rigidez alcançada pelas molas.

Microestruturalmente, sabe-se que as molas tratadas em temperaturas mais elevadas têm a tendência a apresentar comportamento de memória de forma clássico, o que significa uma estrutura martensítica ou uma combinação de martensíta e austeníta. Sendo assim, apenas com esse fato pode-se esperar que estar molas irão apresentar médias de rigidez menores e que irão apresentar um crescimento no valor de rigidez conforme o aumento da temperatura de ensaio.

Para apresentar os resultados das molas, novamente, apresenta-se na figura 4-29 uma comparação macro da rigidez alcançada pelas molas tratadas por 30 minutos.

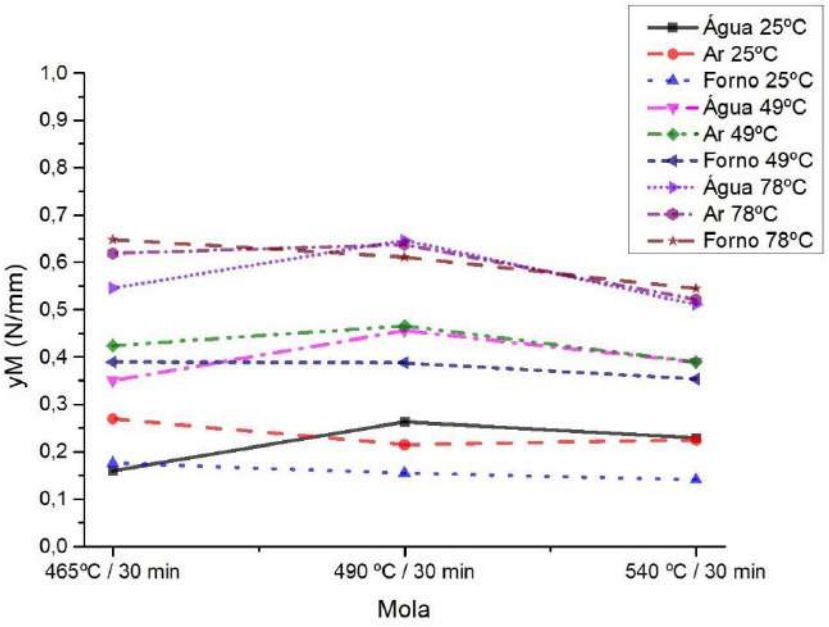


Figura 4-29: Comparação da rigidez das molas tratadas por 30 minutos.

Observando-se a figura 4-29, para a maioria dos casos, as molas que foram envelhecidas em temperaturas mais próximas da temperatura de solubilização de 670ºC apresentaram de modo geral valores de rigidez menores. Pode-se observar ainda que, os maiores valores de rigidez ficaram divididos entre as molas tratadas a 465ºC e 490ºC onde em 5 dos 9 casos, as molas tratadas a 490ºC apresentaram maior rigidez e nos restantes a rigidez foi maior nas molas tratadas a 465ºC. Nota-se que, a maior rigidez para as molas tratadas a 490ºC foi predominante nos ensaios com resfriamento mais rápido, sendo observada essa ocorrência em todos os ensaios com resfriamento a água e em dois dos três ensaios resfriados ao ar.

Em sequência, apresenta-se na figura 4-30 a comparação da rigidez das molas tratadas por 60 minutos para após ser feita uma análise geral.

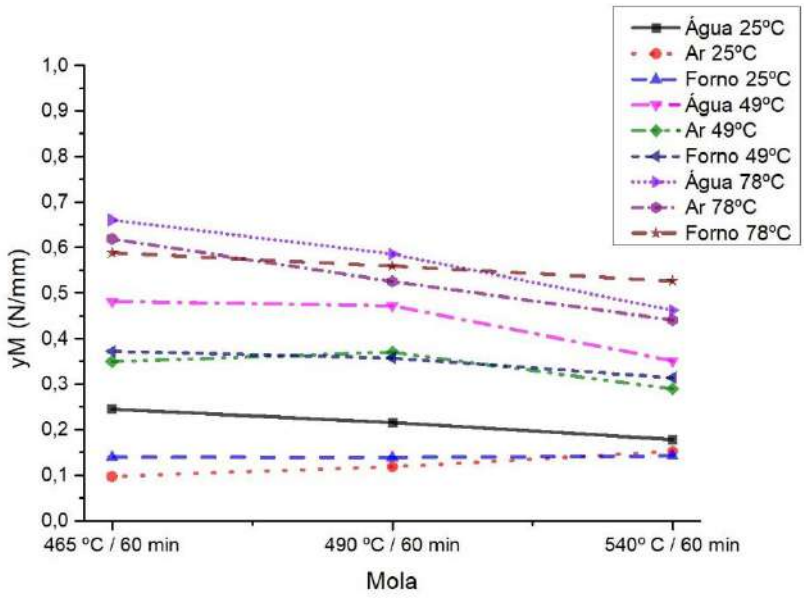


Figura 4-30: Comparação da rigidez das molas tratadas por 60 minutos.

Observando-se os ensaios realizados nas molas com tempo de tratamento 60 minutos, nota-se que as molas tratadas a 465ºC tiveram de modo geral, valores de rigidez maiores em relação as demais temperaturas de tratamento, sendo maiores ou semelhantes a outras temperaturas em 7 dos 9 casos observados. Esse comportamento indica que o

aumento do tempo de tratamento favorece o aumento da rigidez das molas tratadas em temperaturas mais baixas.

Como dito anteriormente, pode-se usar a constatação de Frick *et al.* (2005) para entender parte do comportamento das molas. O tratamento de envelhecimento em temperaturas mais elevadas tende a provocar um aumento dos limites de transformação e por tal, influencia na estrutura apresentada pela liga em temperatura ambiente. Levando esse fato em consideração e analisando-se os dados de DSC obtidos por Duarte pode-se ter entendimento do comportamento observado.

Nos resultados de DSC, nota-se que os valores de Af, tendem a aumentar conforme maior a temperatura de tratamento, mais brando o método de resfriamento e mais longo o processo de tratamento térmico. Este fato por si, com o crescimento de grão, indicaria que as molas tratadas nestas condições deverão ter valores de rigidez menores em relação as demais, entretanto, o método de resfriamento utilizado mostrou-se também influente sobre os limites de transformação da fase R, sendo Rs maior com o quão mais lento o resfriamento.

Estes fatores levam ao entendimento de que, o aumento da temperatura, do tempo de tratamento e um resfriamento mais lento, leva a molas com valores de rigidez menores e comumente a um comportamento de memória de forma convencional. Porém, em aplicações em que se buscam grandes quantidades de dissipação de energia, a presença da fase R se torna indesejada e por tal, sendo mais indicado utilizar temperaturas de tratamento mais baixas.

Entretanto, a presença da fase R é aceitável para aplicações onde a dissipação de energia é irrelevante e apenas a rigidez é um fator a ser considerado. (GÉDOUIN, 2019).

Seguindo, apresenta-se nas figuras 4-31 e 4-32 respectivamente os valores de rigidez de todas as molas tratadas por 30 e 60 minutos em relação a temperatura de tratamento e separadas por blocos para auxiliar a visualização.

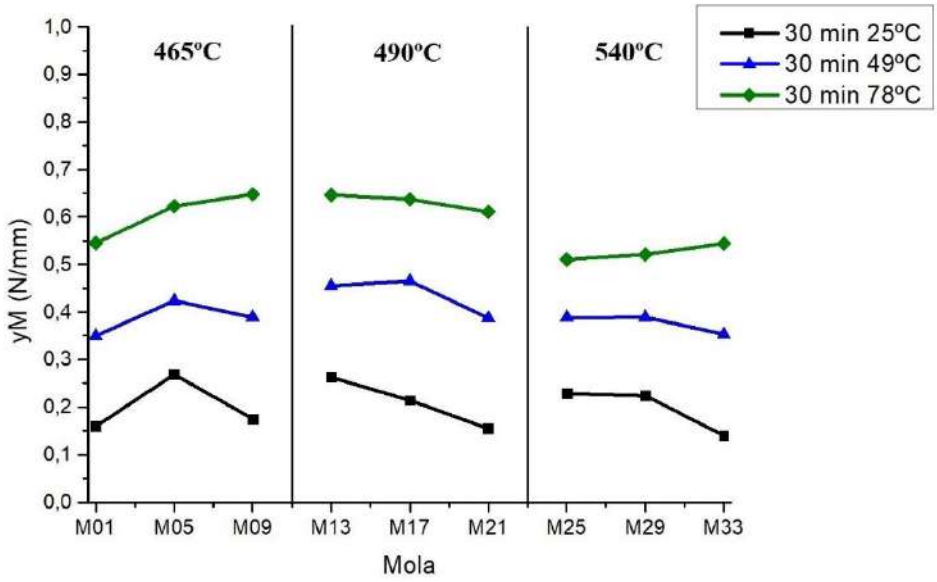


Figura 4-31: Comparação da rigidez das molas tratadas por 30 minutos em cada temperatura de tratamento.

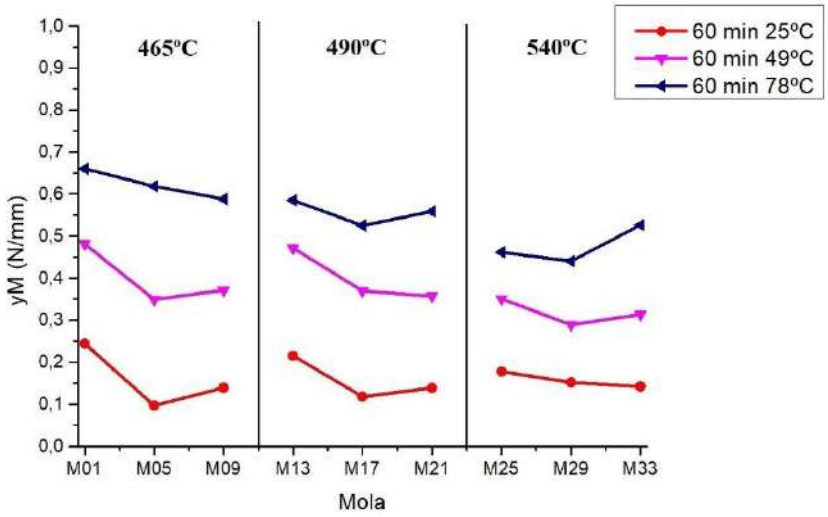


Figura 4-32: Comparação da rigidez das molas tratadas por 60 minutos em cada temperatura de tratamento.

Analisando-se os gráficos apresentados nas figuras 4-31 e 4-32 observa-se que para as molas tratadas por 30 minutos, apesar dar variações nos resultados as curvas tendem a uma estabilidade mantendo-se dentro de uma mesma média principalmente para os ensaios em temperatura ambiente e com 49ºC de temperatura de ensaio enquanto, para

os ensaios com 78ºC de temperatura, observa-se levemente um início da redução dos valores de rigidez para as molas M25, M29 e M33.

Por outro lado, para os ensaios das molas tratada por 60 minutos, fica mais evidente a redução gradual da rigidez das molas conforme o aumento da temperatura de tratamento e a redução da velocidade de resfriamento.

Estes resultados corroboram com o que foi observado no estudo de Frick *et al.* (2005) comentado anteriormente e evidenciando a influência do tempo de tratamento na rigidez das molas.

4.3.2. Discussão dos Resultados

Os resultados encontrados mostram certos comportamentos ao longo de todos os ensaios realizados. De modo geral, todas as molas, após aquecimento, mostraram um estreitamento no laço de histerese em troca de um aumento da tensão máxima atingida. Este comportamento pode ser observado em outros estudos como no estudo de Enemark (2016), mostrado anteriormente na figura 2-13, onde é possível observar que para as molas com mesma deflexão e frequência, valores maiores de força da mola e quantidades menores de energia dissipada, em função do aumento da temperatura da mola.

É importante destacar que nem sempre este comportamento irá levar a uma redução da quantidade de energia dissipada. Sendo assim, o entendimento da influência dos parâmetros de fabricação para determinar qual a temperatura de trabalho ideal é importante para projetar aplicações de molas de SMA de forma otimizada.

No estudo de Heidari *et al.* (2016) também é possível ver, comparativamente, a influência da temperatura de tratamento nos limites de transformação como mostrado na figura 4-33.

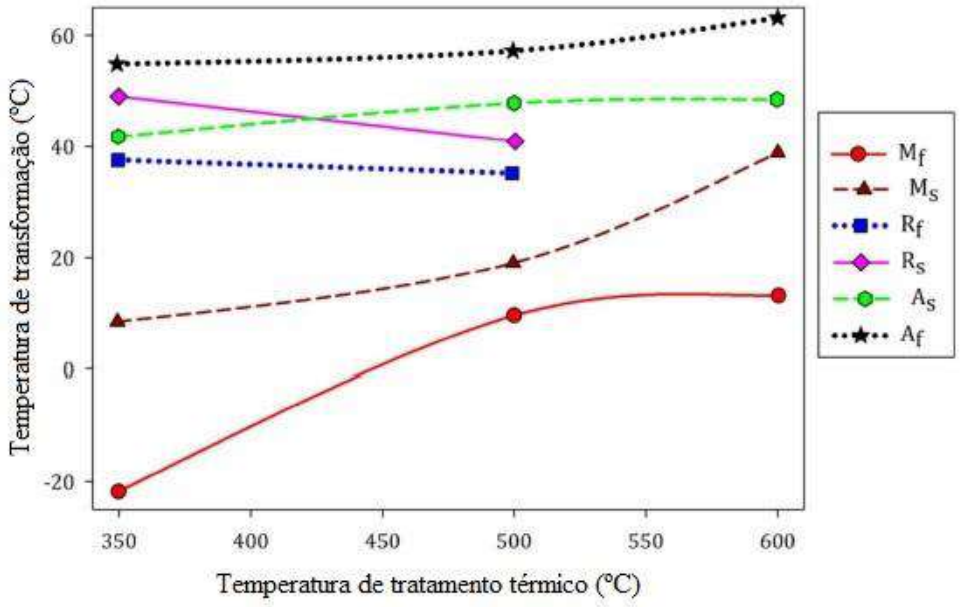


Figura 4-33: Influência da temperatura de tratamento nos limites de transformação (HEIDARI *et al.*, 2016).

Aqui é possível observar a influência da temperatura de tratamento nos limites de transformação das molas fabricadas com Heidari *et al*. (2016).

Da mesma maneira, o estudo feito por Frick *et al.* (2005) pode exemplificar-se pela figura 4-34 a variação dos limites de transformação dos ensaios realizados no dito estudo onde apresentam-se os resultados de DSC feitos foi Frick desde a amostra recém produzida até a envelhecida em 600ºC.

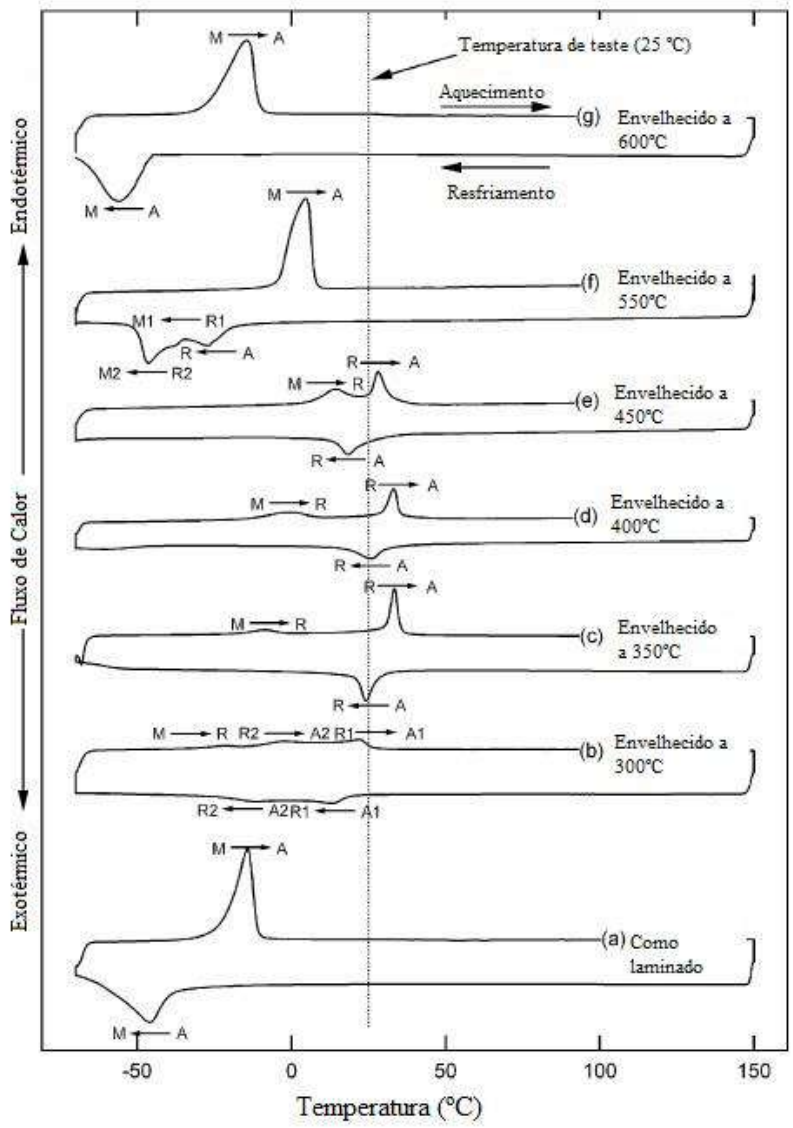


Figura 4-34: Ensaios de DSC feitos por Frick *et al* (2005). Gráficos de DSC do NiTi laminado a quente: (a) como laminado, (b) envelhecido a 300ºC, (c) envelhecido a 350ºC, (d) envelhecido a 400ºC, (e) envelhecido a 450ºC, (f) envelhecido a 550ºC e (g) envelhecido a 600ºC por 1,5h.

Estes resultados reforçam a importância do controle da temperatura de tratamento, pois ela irá afetar a quantidade de cada fase presente na mola em sua temperatura de trabalho em uma determinada aplicação, o que poderá ter um efeito positivo ou negativo dependendo do projeto.

Observando de forma ampla, nota-se que cada parâmetro de fabricação tem influência em mais de uma característica da mola, porém, mostram maior influência em

um determinado aspecto o que torna possível realizar tratamentos de forma direcionada para atingir determinadas características necessárias para uma aplicação em particular. Com isso, com os dados obtidos e apresentados neste estudo pode-se ter algumas conclusões sobre a influência dos parâmetros de fabricação nas características das molas e como isso afeta o projeto de molas com ligas de memória de forma.

5. Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros

A partir dos testes realizados foi possível avaliar a influência dos parâmetros do tratamento térmico nas características nas molas de SMA. Todas as molas foram ensaiadas em diferentes condições com objetivo de alcançar uma média dentre os resultados obtidos. Pode-se então apresentar algumas conclusões:

- Quanto ao método de resfriamento, observou-se que este apresentou influência principalmente no comportamento das molas em diferentes temperaturas de trabalho. Observou-se pelos resultados de DSC obtidos por Duarte que os diferentes meios de resfriamento influenciaram nos limites de transformação da liga. Por consequência, influenciando a microestrutura presente na mola em uma determinada temperatura de trabalho onde se observou que, as molas tratadas por 30 minutos, observou-se que as molas resfriadas ao forno tiveram melhor aproveitamento da variação da temperatura de ensaio, enquanto para as molas tratadas por 60 minutos o aproveitamento foi maior entre as molas resfriadas ao ar.

  Esse fato indica que, pela escolha correta do método de resfriamento pode-se se otimizar o rendimento das molas fabricadas para determinada aplicação com trabalho em diferentes temperaturas.
- Quanto ao tempo de tratamento foi observado por estudos anteriores e verificado neste trabalho que este parâmetro tem grande influência na quantidade de energia dissipada e na quantidade deformação residual das molas. Isso ocorreu novamente, pela variação dos limites de transformação que são determinantes na microestrutura presente na liga em uma determinada temperatura e por consequência, determinando se a liga terá estrutura martensítica com efeito de memória de forma convencional ou austenítica trabalhando com efeito pseudo-elástico.

Foi observado neste estudo que o tempo de tratamento provocou uma mudança na quantidade de energia dissipada pelas molas onde, para as molas tratadas por 30 minutos observou-se uma tendência de as molas tratadas a 490ºC apresentarem uma capacidade maior de dissipação enquanto nas molas tratadas por 60 minutos esta tendência mudou para as molas tratadas a 465ºC.

Assim, entende-se que com o quão maior for tempo de tratamento, mais afastada a temperatura de tratamento deverá estar da temperatura de solubilização para buscar a capacidade melhor de dissipação de energia. Esta visão corrobora com os resultados de referências de estudos anteriores onde foi visto que o envelhecimento em temperaturas próximas a 400 ºC favorecem a dissipação de energia. Em contraste, sabe-se que o tempo de tratamento mais elevado propicia o crescimento de grão e consequentemente, a redução da rigidez. E isso pode ser visto claramente, principalmente nos ensaios em temperatura ambiente onde, na comparação da rigidez entre todas as molas, as molas tratadas por 30 minutos ficaram dentro de uma média entre 0,14 N/mm e 0,27 N/mm enquanto as molas tratadas por 60 minutos ficaram entre 0,11 N/mm e 0,24 N/mm.

Sendo assim, entendeu-se que o tempo de tratamento é um parâmetro importante que teve influência em múltiplas características da mola e deve ser considerado com cuidado principalmente em aplicações em que tanto a dissipação de energia quanto a rigidez da mola são fatores importantes de projeto.

- Em relação a temperatura de tratamento, novamente observou-se grandes variações na quantidade de energia dissipada por cada mola e assim como os demais parâmetros, essa variação vem através dos limites de transformação.

  Como visto em outros parâmetros, alterar a quantidade de cada fase presente na mola em uma determinada temperatura influencia no comportamento da mola.

Além disso, estudos anteriores indicam que o envelhecimento em temperaturas próximas a temperatura de solubilização aumenta a taxa de absorção da liga levando a geração de menos precipitados o que desfavorece a dissipação de energia condizendo com os resultados obtidos neste estudo. Ao mesmo tempo, sabendo que a presença de menos precipitados desfavorece a ocorrência da fase R, entende-se que mesmo em temperaturas de envelhecimento mais elevadas ainda é possível se ter bons valores de dissipação de energia quando comparados com temperaturas menores em que há a ocorrência da fase R.

Sendo assim, entende-se que para este parâmetro, o equilibro na escolha da temperatura de tratamento é importante para ajustar a quantidade de precipitados ao mesmo tempo que se busca evitar o surgimento da Fase R.

- Por fim, em relação a rigidez das molas, para todos os parâmetros de fabricação apresentaram influência nesta característica. Foi observada uma tendência de decrescimento da rigidez com o quão mais brando foi o resfriamento, o quão maior foi a temperatura de tratamento e o quão maior foi o tempo de tratamento. Entretanto, dentre estes parâmetros, entendeu-se que o tempo de tratamento é o parâmetro que mais afeta a rigidez da mola, uma vez que o tratamento foi períodos mais longos levou a um decrescimento mais claro da rigidez pelo maior tempo para a ocorrência do crescimento de grão na liga.

Estas conclusões mostram que todos os parâmetros estudados afetaram as molas pela variação dos limites de transformação, e por consequência, a alteração da fase estável da liga. Com esses resultados, concluiu-se que estes parâmetros devem ser trabalhados juntos de forma a atingir uma determinada microestrutura desejada pelo ajuste fino dos limites de transformação, controlando mais precisamente a fase presente na liga.

Assim, pelas análises e resultados obtidos ao longo deste estudo, pode-se ter um entendimento melhor de um ponto de vista macro de como as variações de mais de um parâmetro de tratamento, tem a capacidade de criar ligas com comportamentos únicos, expandindo as possibilidades de usos em projetos mecânicos.

Os resultados mostram ainda que, o estudo da influência dos métodos de fabricação sobre o comportamento das molas pode se aprofundar com um estudo micro estrutural da liga resultante do tratamento térmico através da análise microscópica e/ou, a realização de um estudo limitado a um número menor de amostras porem, com maior variação nas frequências de ensaios, temperaturas de trabalho e um aparato de teste com dimensões e construção mais precisas. Assim, se sugere para trabalhos futuros:

- Uma análise partindo da fabricação de molas de forma semelhante à realizada no trabalho de Duarte (2019), focando em estudar a microestrutura resultante do processo de fabricação e observando a quantidade de cada fase presente na mola em temperatura ambiente para dessa forma, entender as variações na dissipação de energia durante ensaios dinâmicos.
- Um estudo a partir da fabricação de várias molas com os mesmos parâmetros no processo de fabricação e realizando os mesmos estudos dinâmicos buscando analisar estatisticamente a variabilidade das molas em relação a um mesmo processo de fabricação.
- Realização de um estudo semelhante ao apresentado aqui, reduzindo o número de molas, mas elevando o número de variações dos parâmetros de ensaio. Pela utilização de um número maior de frequências, e temperaturas de ensaio mais variadas pode ser um meio mais eficaz de entender mais a fundo a influência de um determinado parâmetro de fabricação no comportamento das molas.

Referências Bibliográficas

ABUZAID, W.; SEHITOGLU, H. Shape memory effect in FeMnNiAl iron-based shape memory alloy. **Scripta Materialia**, v. 169, p. 57-60, 2019.

AGUIAR, R. A. A. Análise da Redução de Vibrações em Sistemas Mecânicos Utilizando Ligas om Memória de Forma. Rio de Janeiro: COPPE UFRJ, 2011

AGUIAR, R. A. A.; SAVI, M. A.; PACHECO, P. M. C. L. Experimental investigation of vibration reduction using shape memory alloys. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 24, n. 2, p. 247-261, 2013.

ASHRAFI, M. J. GHAFFARI, I.; ELAHINIA, M.; NEMATOLLAHI, M. R Nonlinear free vibration and damping analysis of a microbeam with pseudoelastic shape memory alloy layer based on the modified couple stress theory. **Journal of Vibration and Control**, v. 27, n. 7-8, p. 957-968, 2021.

BANIASADI, M.; FOYOUZAT, A.; BAGHANI, M. Multiple shape memory effect for smart helical springs with variable stiffness over time and temperature. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 182, p. 105742, 2020.

BENAFAN, O.; NOEBE, R. D.; PADULA II, S. A.; BROWN, D. W.; VOGEL, S.; VAIDYANATHAN, R. Thermomechanical cycling of a NiTi shape memory alloy-macroscopic response and microstructural evolution. **International Journal of Plasticity**, v. 56, p. 99-118, 2014.

BUTLER, G. M.; PERAZA HERNANDEZ, E. A. Tensegrity structures incorporating actuator and pseudoelastic shape memory alloys. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. American Society of Mechanical Engineers, 2020. p. V004T04A006.

CASCIATI, S.; HAMDAOUI, K. Experimental and numerical studies toward the implementation of shape memory alloy ties in masonry structures. **Smart Structures and Systems**, v. 4, n. 2, p. 153-169, 2008.

COSTANZA, G.; TATA, M. E. Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review. **Materials**, v. 13, n. 8, p. 1856, 2020.

DAYANANDA, G. N.; RAO, M. S. Effect of strain rate on properties of superelastic NiTi thin wires. **Materials Science and Engineering: A**, v. 486, n. 1-2, p. 96-103, 2008.

DIAS, R. F. Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga níquel-titânio superelástica. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

DIETER, G. E.; BACON, D. J. **Mechanical metallurgy**. New York: McGraw-hill, 1986.

DUARTE, B. T. Fabricação e caracterização de molas helicoidais de ligas com memória de forma. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2019.

ENEMARK, S.; SANTOS, I. F.; SAVI, M. A. Modelling, characterisation and uncertainties of stabilised pseudoelastic shape memory alloy helical springs. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 27, n. 20, p. 2721-2743, 2016.

FAVIER, D.; LIU, Y.; ORGÉAS, L.; SANDEL, A.; DEBOVE, L.; COMTE-GAZ, P. Influence of thermomechanical processing on the superelastic properties of a Ni-rich Nitinol shape memory alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 429, n. 1-2, p. 130-136, 2006.

FAN, G.; CHEN, W.; YANG, S.; ZHU, J.; REN, X.; OTSUKA, K. Origin of abnormal multi-stage martensitic transformation behavior in aged Ni-rich Ti–Ni shape memory alloys. **Acta Materialia**, v. 52, n. 14, p. 4351-4362, 2004.

FAN, G.; ZHOU, Y.; CHEN, W.; YANG, S.; REN, X.; OTSUKA, K. Precipitation kinetics of Ti3Ni4 in polycrystalline Ni-rich TiNi alloys and its relation to abnormal multi-stage transformation behavior. **Materials Science and Engineering: A**, v. 438, p. 622-626, 2006.

FAN, Q. C., ZHANG, Y.H.; WANG, Y.Y.; SUN, M.Y.; MENG, Y.T.; HUANG, S.K.; WEN, Y.H. Influences of transformation behavior and precipitates on the deformation behavior of Ni-rich NiTi alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 700, p. 269-280, 2017.

FANG, C.; LIANG, D.; ZHENG, Y.; YAM, M. C. H.; SUN, R. Rocking bridge piers equipped with shape memory alloy (SMA) washer springs. **Engineering Structures**, v. 214, p. 110651, 2020.

FRICK, C. P. ORTEGA, A. M.; TYBER, J.; MAKSOUND, A. El. M., MAIER, H. J. LIU, Y. GALL, K. Thermal processing of polycrystalline NiTi shape memory alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 405, n. 1-2, p. 34-49, 2005.

GALL, K.; MAIER, H. J. Cyclic deformation mechanisms in precipitated NiTi shape memory alloys. **Acta Materialia**, v. 50, n. 18, p. 4643-4657, 2002.

GÉDOUIN, P.A.; PINO, L.; CHIRANI, S. A.; CALLOCH, S.; DELALEAU, E.; BOURGEOT, J. M. R-phase shape memory alloy helical spring based actuators: Modeling and experiments. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 289, p. 65-76, 2019.

HASHEMI, Y. M.; KADKHODAEI, M.; MOHAMMADZADEH, M. R. Fatigue analysis of shape memory alloy helical springs. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 161, p. 105059, 2019.

HAYRETTIN, C.; KARAKOC, O.; KARAMAN, I.; MABE, J. H.; SANTAMARTA, R.; PONS, J. Two-way shape memory effect in Ni-Ti-Hf high temperature shape memory alloy tubes. **Acta Materialia**, v. 163, p. 1-13, 2019.

HECKMANN, A.; HORNBOGEN, E. Microstructure and pseudo-elastic low-cycle high amplitude fatigue of NiTi. In: **Journal de Physique IV (Proceedings)**. EDP sciences, 2003. p. 831-834.

HEIDARI, B.; KADKHODAEI, M.; BARATI, M.; KARIMZADEH, F. Fabrication and modeling of shape memory alloy springs. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 12, p. 125003, 2016.

HUANG, B.; LV, H.; SONG, Y. Numerical simulation and experimental study of a simplified force-displacement relationship in superelastic SMA helical springs. **Sensors**, v. 19, n. 1, p. 50, 2018.

IMRAN, H. Y.; MAJID, D. L. A. A.; BIN ABDUL, M. F. Thermomechanical performance of helical shape memory alloy springs immersed in heated and cooled water system. **Advances in Mechanics**, v. 10, n. 2, p. 1487-1506, 2022.

JIN, H.; DONG, E.; XU, M.; LIU, C.; ALICI, C.; JIE, Y. Soft and smart modular structures actuated by shape memory alloy (SMA) wires as tentacles of soft robots. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 8, p. 085026, 2016.

KARACA, H. E.; SAGHAIAN, S. M.; DED, G.; TOBE, H.; BASARAN, B.; MAIER, H. J.; NOEBE, R. D.; CHUMLYAKOV, Y. I. Effects of nanoprecipitation on

the shape memory and material properties of an Ni-rich NiTiHf high temperature shape memory alloy. **Acta Materialia**, v. 61, n. 19, p. 7422-7431, 2013.

KARIMZADEH, M.; ABOUTALEBI M. R.; SALEHI, M. T.; ABBASI, S. M.; MORAKABATI, M. Effects of thermomechanical treatments on the martensitic transformation and critical stress of Ti–50.2 at. % Ni alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 637, p. 171-177, 2015.

KHALEGHI, F.; KHALIL-ALLAFI, J.; ABBASI-CHIANEH, V.; NOORI, S. Effect of short-time annealing treatment on the superelastic behavior of cold drawn Ni-rich NiTi shape memory wires. **Journal of alloys and compounds**, v. 554, p. 32-38, 2013

KHALIL-ALLAFI, J.; DLOUHY, Na.; EGGELER, G. Ni4Ti3-precipitation during aging of NiTi shape memory alloys and its influence on martensitic phase transformations. **Acta materialia**, v. 50, n. 17, p. 4255-4274, 2002.

KIM, H. Y.; IKEHARA, Y.; KIM, J. I.; HOSODA, H.; MIYAZAKI, S. Martensitic transformation, shape memory effect and superelasticity of Ti–Nb binary alloys. **Acta Materialia**, v. 54, n. 9, p. 2419-2429, 2006.

KIM, J. I.; MIYAZAKI, S. Effect of nano-scaled precipitates on shape memory behavior of Ti-50.9 at.% Ni alloy. **Acta Materialia**, v. 53, n. 17, p. 4545-4554, 2005.

KUMAR, P. K.; DESAI, U.; MONROE, J. A.; LAGOUDAS, D. C.; KARAMAN, G. B.; NOEBE, R. D. Experimental investigation of simultaneous creep, plasticity and transformation of Ti50. 5Pd30Ni19. 5 high temperature shape memory alloy during cyclic actuation. **Materials Science and Engineering: A**, v. 530, p. 117-127, 2011.

LAGOUDAS, D. C. (Ed.). **Shape memory alloys: modeling and engineering applications**. Springer Science & Business Media, 2008.

LEAL, P. B. C.; SAVI, M. A. Shape memory alloy-based mechanism for aeronautical application: Theory, optimization and experiment. **Aerospace Science and Technology**, v. 76, p. 155-163, 2018.

LI, P.; WANG, Y.; MENG, F.; LE, C.; HE, Z. Effect of heat treatment temperature on martensitic transformation and superelasticity of the ti49ni51 shape memory alloy. **Materials**, v. 12, n. 16, p. 2539, 2019

LIU, Y.; XIE, Z.; HUMBEECK, J. V. Cyclic deformation of NiTi shape memory alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 273, p. 673-678, 1999.

LV, H.; HUANG, B. Parametric study of a new tuned mass damper with pre-strained SMA helical springs for vibration reduction. **SMART STRUCTURES AND SYSTEMS**, v. 31, n. 1, p. 89-100, 2023.

MACHADO, L. E.; SAVI, M. A. Aplicações médicas de ligas com memória de forma. **Revista Brasileira de Pesquisas Médicas e Biológicas**, 683-691, 2003

MA, H. **Thermal modeling of shape memory alloy wire actuators for automotive applications**. 2010. Dissertação de Mestrado. University of Waterloo.

MAGELA, J. O. Influência de tratamentos térmicos e mecânicos nas temperaturas de transformação martensítica em ligas Ni-Ti com efeito memória de forma. Belo Horizinte: Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2010

MANDRU, D.; LUNGU, I.; NOVEANU, S.; TATAR, O. Shape memory alloy wires as actuators for a minirobot. In: **2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)**. IEEE, 2010. p. 1-4.

MICHUTTA, J.; SOMSEN, C.; YAWNY, A.; DLOUHY, A.; EGGELER, G. Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi single crystals with Ni4Ti3 precipitates. **Acta materialia**, v. 54, n. 13, p. 3525-3542, 2006.

MIYAZAKI, S.; IGO, Y.; OTSUKA, K. Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of Ti - Ni alloys. **Acta Metallurgica**, v. 34, n. 10, p. 2045-2051, 1986.

MOHD J. J.; LEARY, M.; SUBIC, A. Designing shape memory alloy linear actuators: A review. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 13, p. 1699-1718, 2017.

MONTEIRO, P. C. C.; MONTEIRO, L. L. S.; SAVI, M. S.; NETTO, T. A., PACHECO, P. M. C. L.; PAIVA, T. A comparative analysis of different shape memory alloy actuator configurations. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 11, p. 1415-1427, 2017.

MONTEIRO JR, P. C. C.; MONTEIRO, L. L. S.; SAVI, M. S.; NETTO, T. A., SAVI, M. A. Experimental investigation of the influence of the heating rate in an SMA actuator performance. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 199, p. 254-259, 2013.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. John wiley & sons, 2017.

MORIN, C.; MOUMNI, Z.; ZAKI, W. Thermomechanical coupling in shape memory alloys under cyclic loadings: experimental analysis and constitutive modeling. **International Journal of Plasticity**, v. 27, n. 12, p. 1959-1980, 2011.

NAM, N. D.; TUAN V. A.; YEN, N. H., LAP, D. V.; KHANH, P. M. A study of phase transformation in shape memory alloy cual9fe4. **Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD)**, v. 42, n. 2, p. 72-75, 2019

NETTO, C.; COLODETE, R. Estadiamento da força desenvolvida pelas diferentes molas do pilates em diferentes distâncias de tensão. **Perspectivas Online 2007-2011**, v. 2, n. 8, 2008.

NISBETT, J. K.; BUDYNAS, R. G.; KEITH, N. J. **Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016.

OLIVEIRA, H. S.; DE PAULA, A. S. COBEM-2019-2425 THE INFLUENCE OF AGING ON NI-RICH NI-TI PSEUDOELASTICSPRINGS.

OLIVEIRA, H. S. Análise da inflência do tratamento térmico de ligas NiTi em aplicações dinâmicas. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2018.

OSMAN, I. S.; HARIRI, N. G.. Thermal Investigation and Optimized Design of a Novel Solar Self-Driven Thermomechanical Actuator. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5078, 2022.

OTSUKA, K.; REN, X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. **Progress in materials science**, v. 50, n. 5, p. 511-678, 2005.

OZBULUT, O. E.; HURLEBAUS, S., Seismic assessment of bridge structures isolated by a shape memory alloy/rubber-based isolation system. **Smart Materials and Structures**, v. 20, n. 1, p. 015003, 2010

OZBULUT, O. E.; HURLEBAUS, S.; DESROCHES, R. Seismic response control using shape memory alloys: a review. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 22, n. 14, p. 1531-1549, 2011.

RAVARI, B. K.; FARJAMI, S.; NISHIDA, M. Effects of Ni concentration and aging conditions on multistage martensitic transformation in aged Ni-rich Ti–Ni alloys. **Acta materialia**, v. 69, p. 17-29, 2014

RODRIGUE, H.; WANG, W.; KIM, D. R.; AHN, S. H. Curved shape memory alloy-based soft actuators and application to soft gripper. **Composite Structures**, v. 176, p. 398-406, 2017.

SANTIAGO, J. J. M.; SIMÕES, J. B.; ARAÚJO, C. J. Thermomechanical characterization of superelastic Ni-Ti SMA helical extension springs manufactured by investment casting. **Materials Research**, v. 22, 2020.

SANTOS, D. M. Efeito do tratamento térmico nas temperaturas de trasnformação de fase de uma liga NiTi pseudoelástica visando aplicações aeroespaciais. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2019.

SAVI, M. A.; PACHECO P. M. C. L.; GARCIA, M. S., AGUIAR, R. A. A.; SOUZA, L. F. G.; HORA, R. B. Nonlinear geometric influence on the mechanical behavior of shape memory alloy helical springs. **Smart Materials and Structures**, v. 24, n. 3, p. 035012, 2015.

SEHITOGLU, H.; ANDERSON, R.; KARAMAN, I.; GALL, K.; CHUMLYAKOV, Y. Cyclic deformation behavior of single crystal NiTi. **Materials Science and Engineering: A**, v. 314, n. 1-2, p. 67-74, 2001,

SHAW, J. A.; KYRIAKIDES, S. Thermomechanical aspects of NiTi. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 43, n. 8, p. 1243-1281, 1995

SOFLA, A. Y. N.; ELZEY, D. M.; WADLEY, H. N. G. Two-way antagonistic shape actuation based on the one-way shape memory effect. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 19, n. 9, p. 1017-1027, 2008.

SONG, D.; KANG, G.; KAN, Q.; YU, C.; ZHANG, C. The effect of martensite plasticity on the cyclic deformation of super-elastic NiTi shape memory alloy. **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 1, p. 015008, 2013.

SONG, D.; KANG, G.; KAN, Q.; YU, C.; ZHANG, C. Non-proportional multiaxial transformation ratchetting of super-elastic NiTi shape memory alloy: experimental observations. **Mechanics of Materials**, v. 70, p. 94-105, 2014.

STRNADEL, B.; OHASHI, S.; OHTSUKA, H.; ISHIHARA, T.; MIYAZAKI, S. Cyclic stress-strain characteristics of Ti-Ni and Ti-Ni-Cu shape memory alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 202, n. 1-2, p. 148-156, 1995.

WANG, X.; VERLINDEN, B.; KUSTOV, S. Multi-stage martensitic transformation in Ni-rich NiTi shape memory alloys. **Functional Materials Letters**, v. 10, n. 01, p. 1740004, 2017.

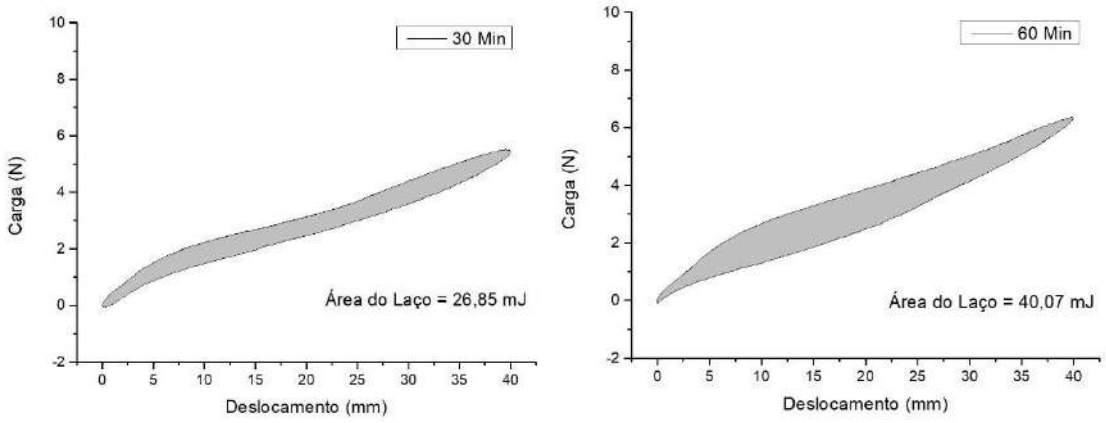
WANG, X.; KUSTOV, S.; LI, K.; SCHRYVERS, D.; VERLINDEN, B.; HUMBEECK, J. V. Effect of nanoprecipitates on the transformation behavior and functional properties of a Ti–50.8 at % Ni alloy with micron-sized grains. **Acta Materialia**, v. 82, p. 224-233, 2015.

YOO, Y. I.; LEE, J. J. Two-way shape memory effect of NiTi under compressive loading cycles. **Physics Procedia**, v. 22, p. 449-454, 2011.

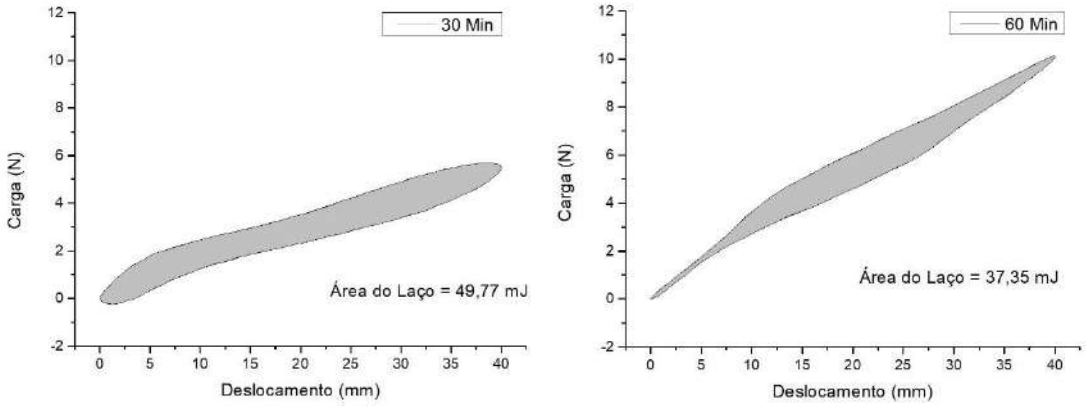
ZHOU, B. A macroscopic constitutive model of shape memory alloy considering plasticity. **Mechanics of Materials**, v. 48, p. 71-81, 2012.

ZHOU, Y.; Zhang, J.; Fan, G.; Ding X.; Sun, J. Ren, X. Origin of 2-stage R-phase transformation in low-temperature aged Ni-rich Ti–Ni alloys. **Acta materialia**, v. 53, n. 20, p. 5365-5377, 2005.

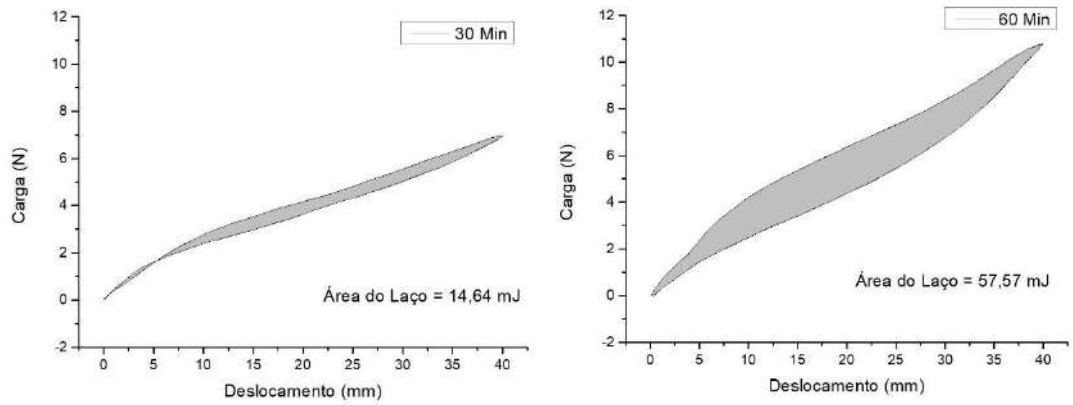
Anexo I



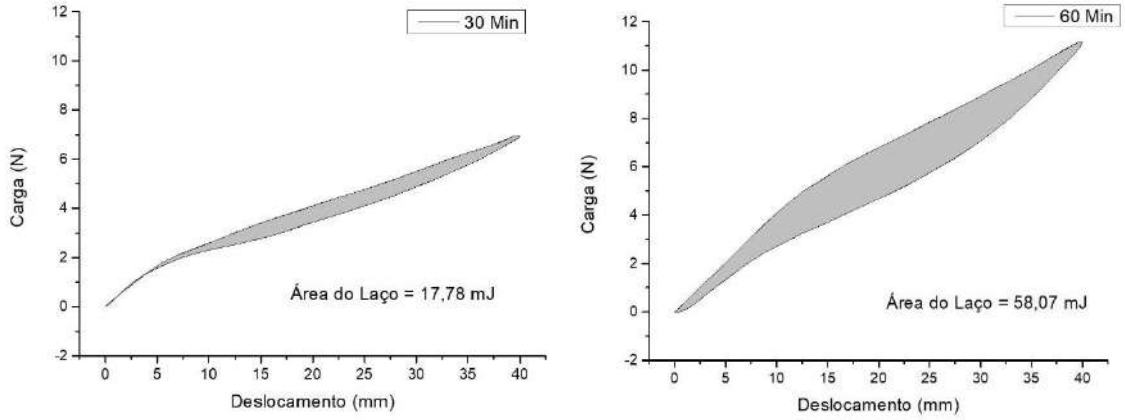
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



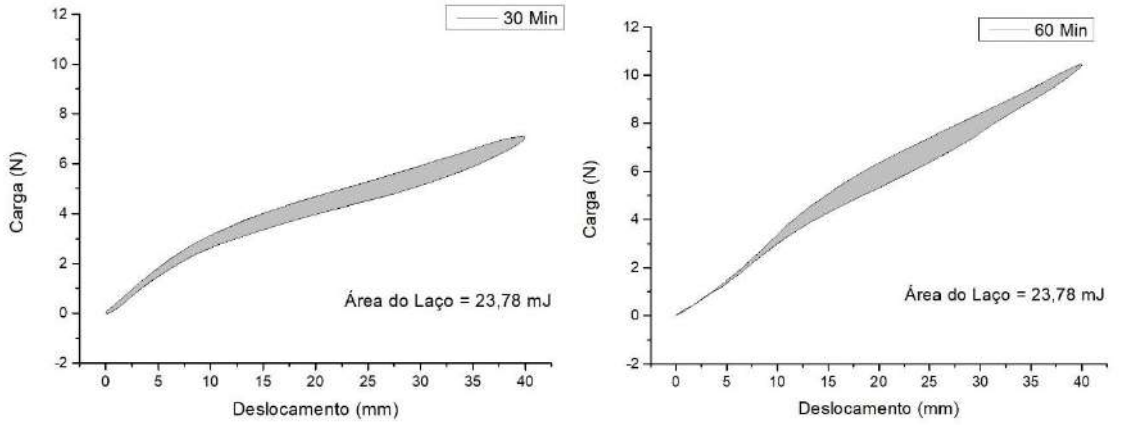
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



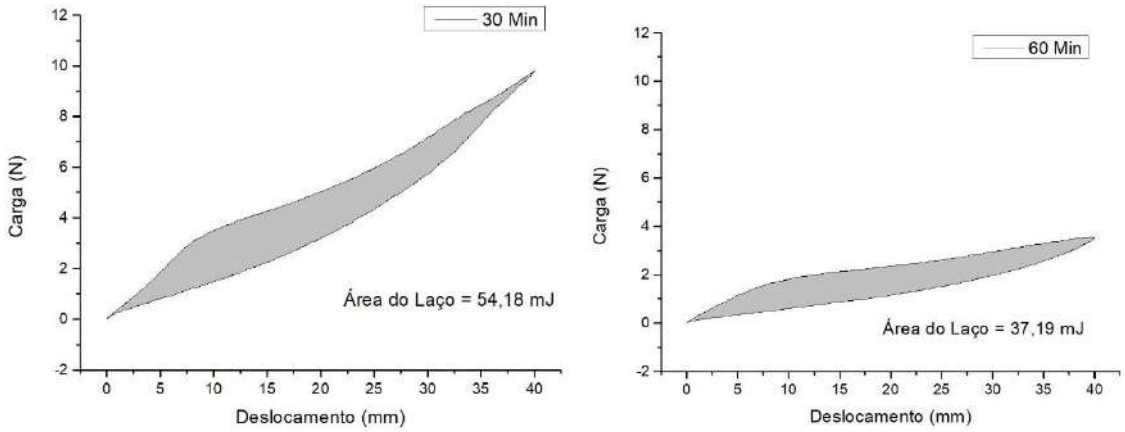
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



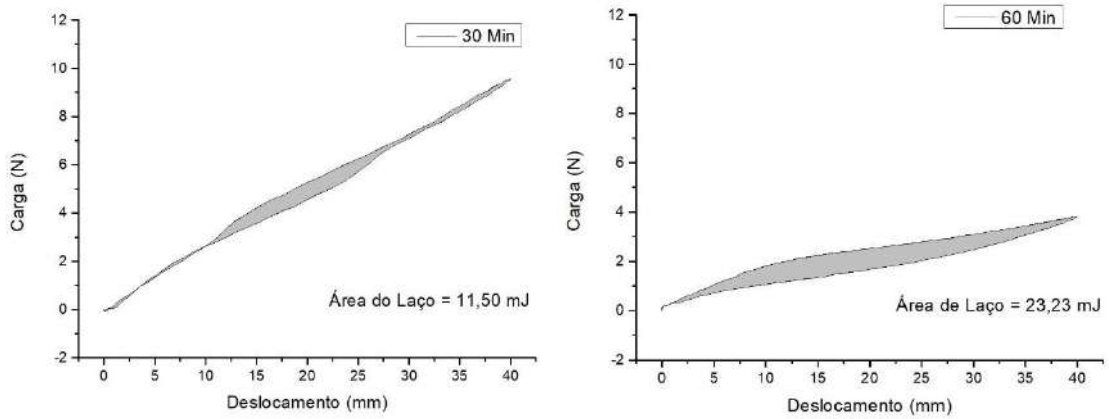
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



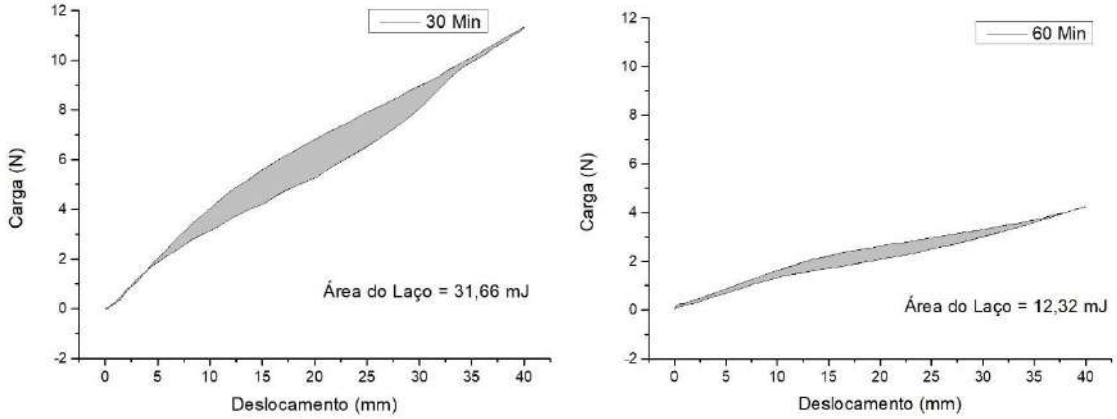
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



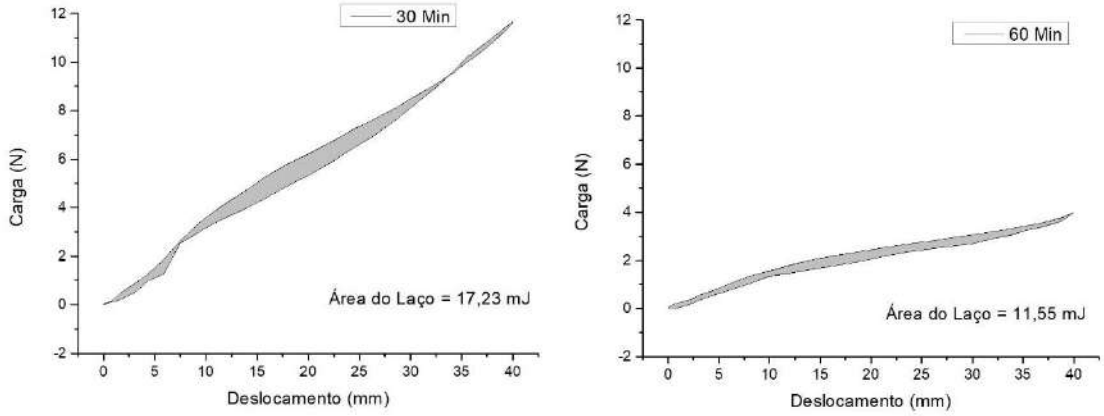
465ºC – Resfriamento em Ar – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



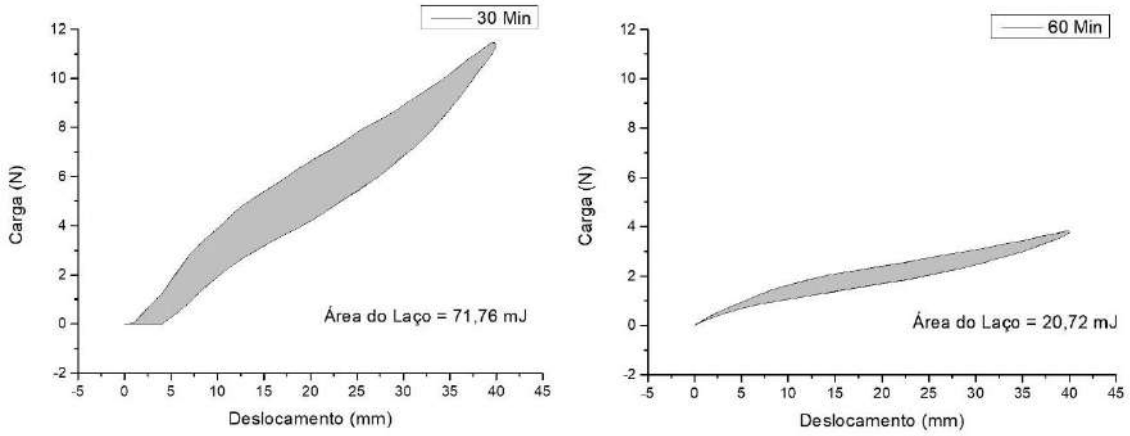
465ºC – Resfriamento em Ar – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



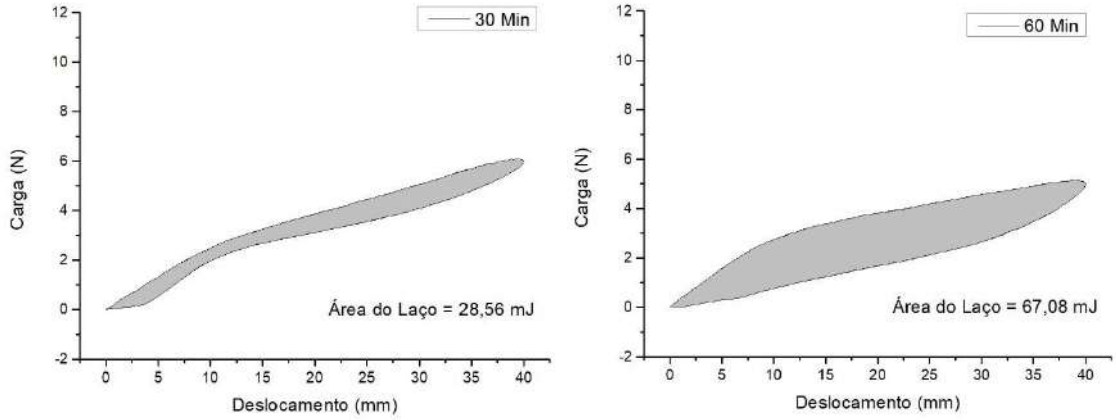
465ºC – Resfriamento em Ar – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



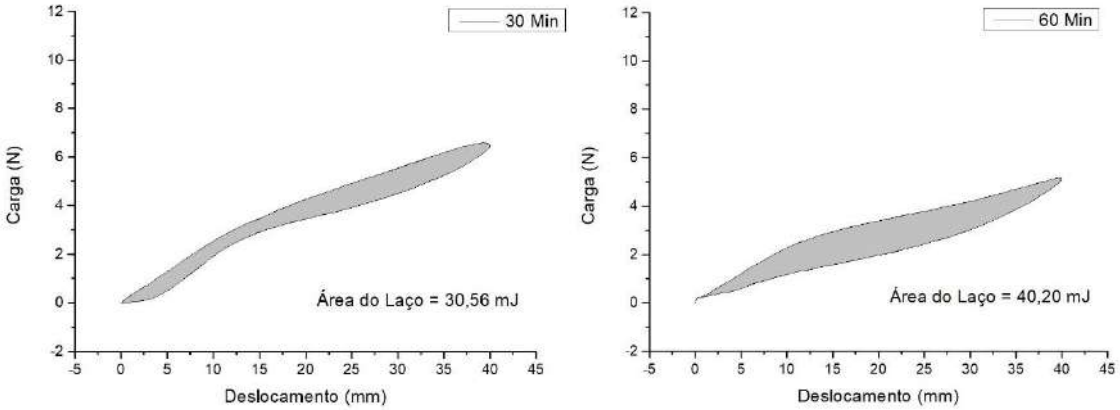
465ºC – Resfriamento em Ar – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



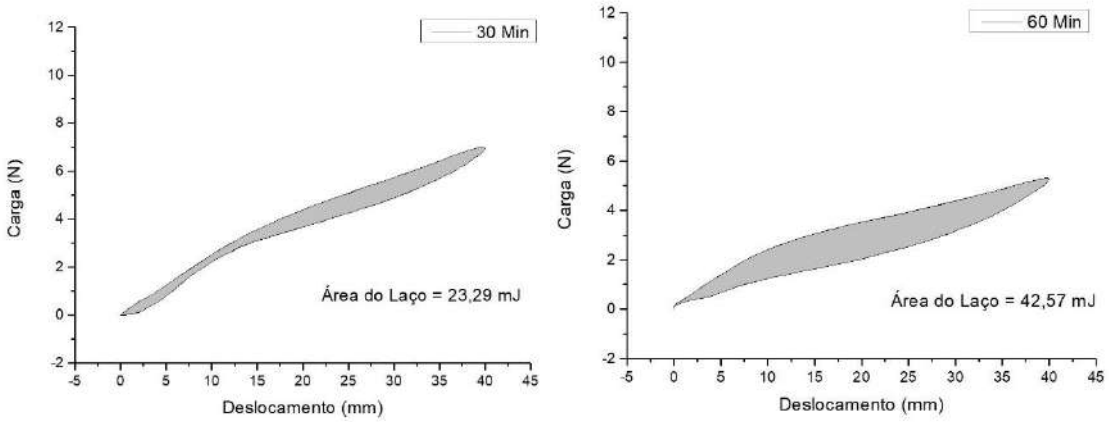
465ºC – Resfriamento em Ar – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



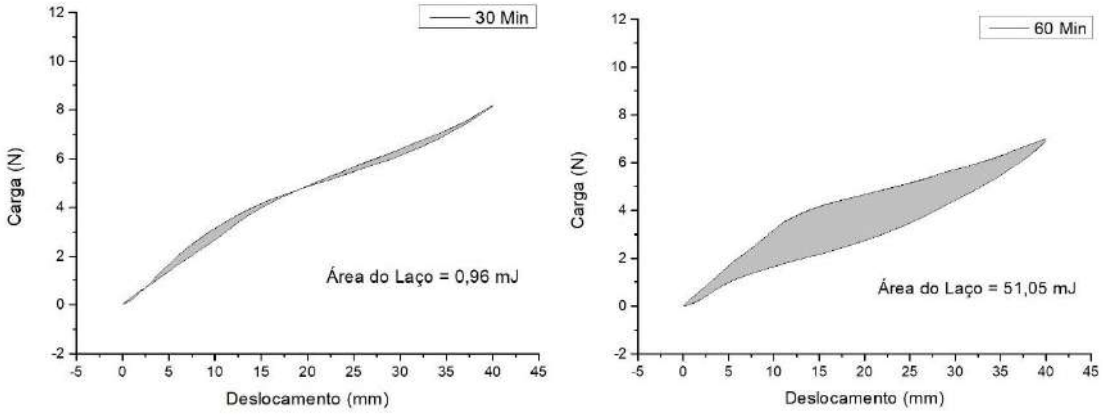
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



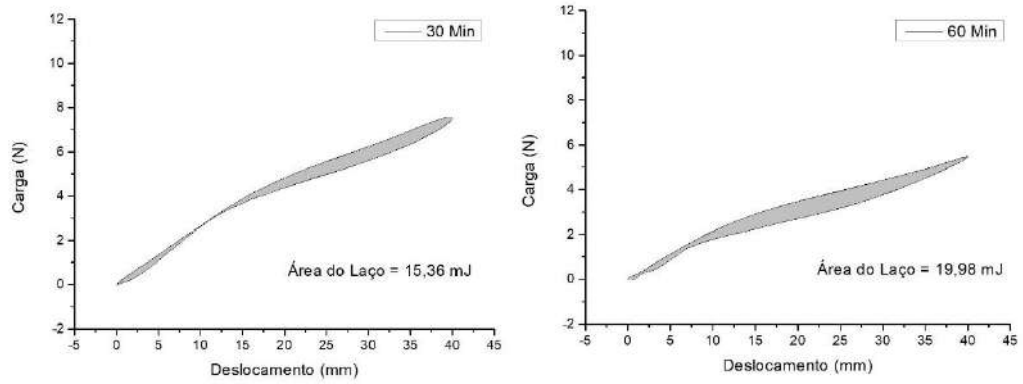
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



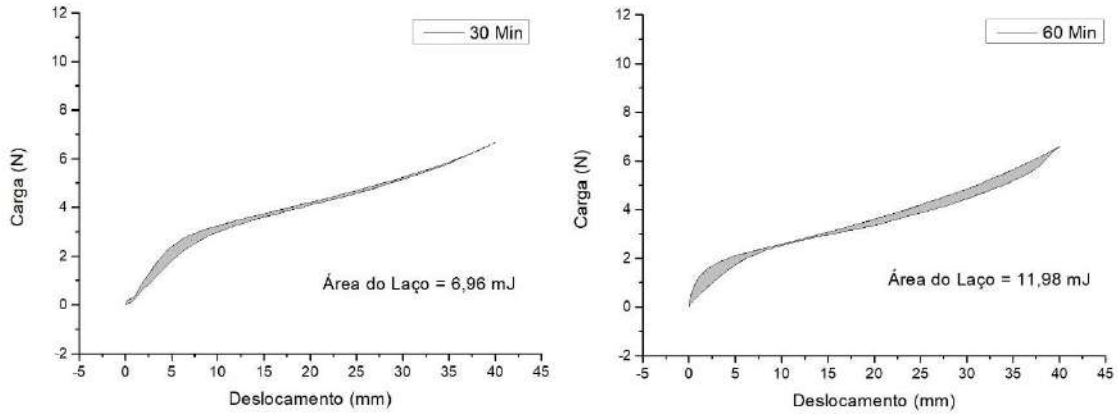
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



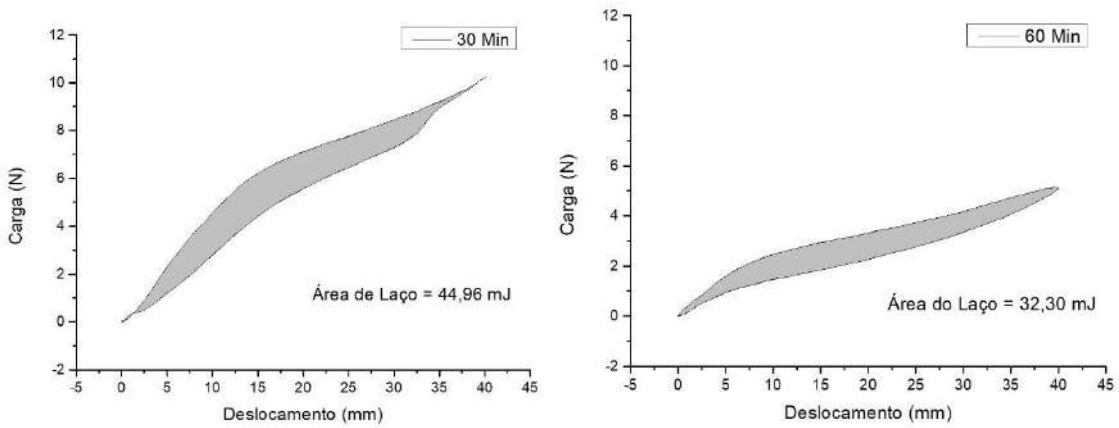
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



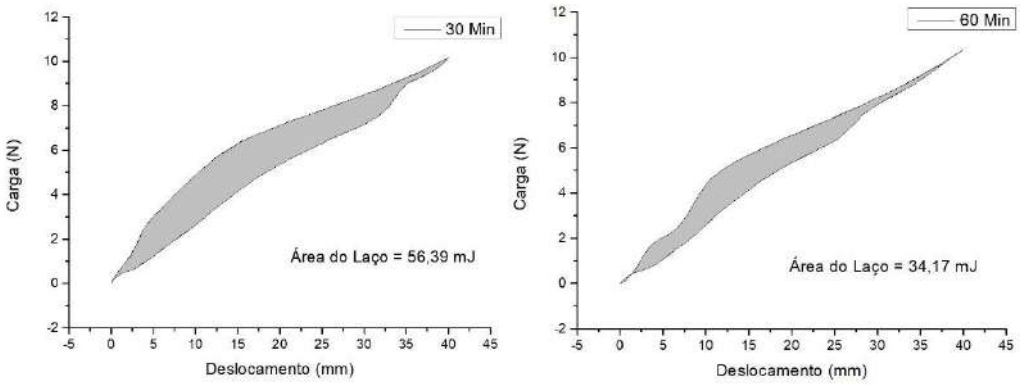
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



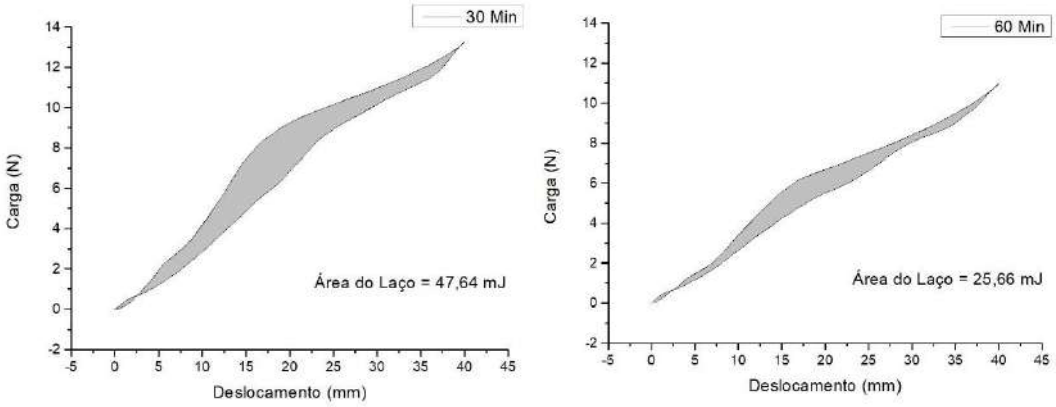
490ºC – Resfriamento ao Água – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



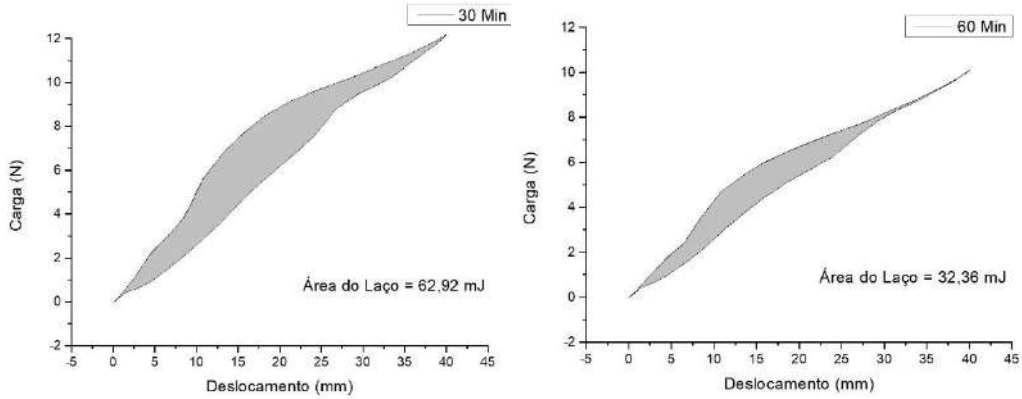
490ºC – Resfriamento ao Água – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



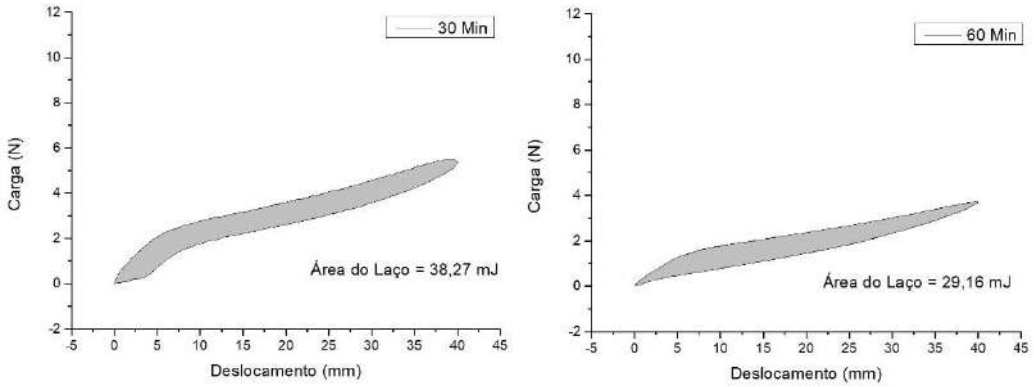
490ºC – Resfriamento ao Água – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



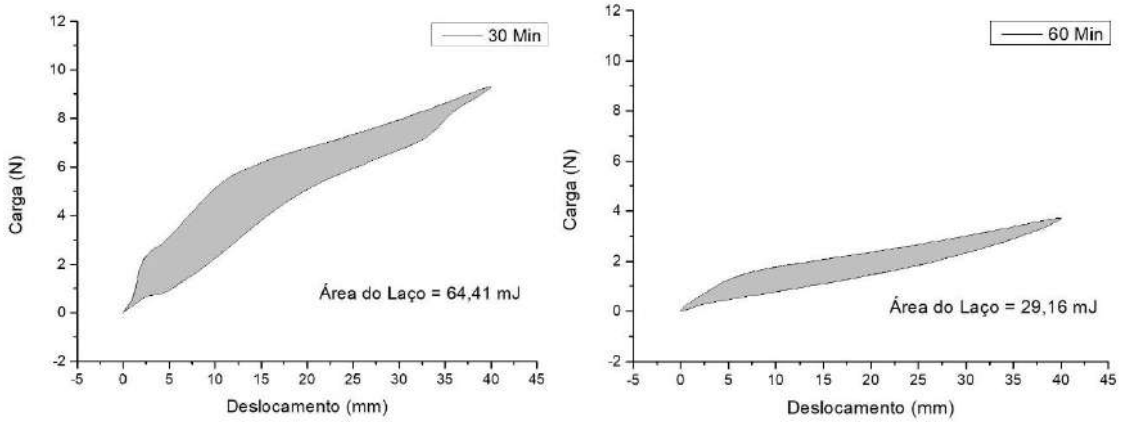
490ºC – Resfriamento ao Água – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



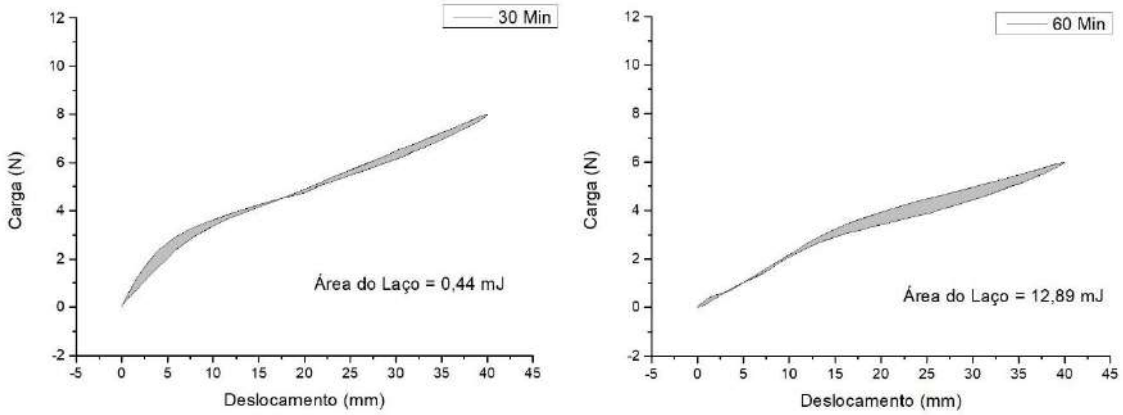
490ºC – Resfriamento ao Água – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



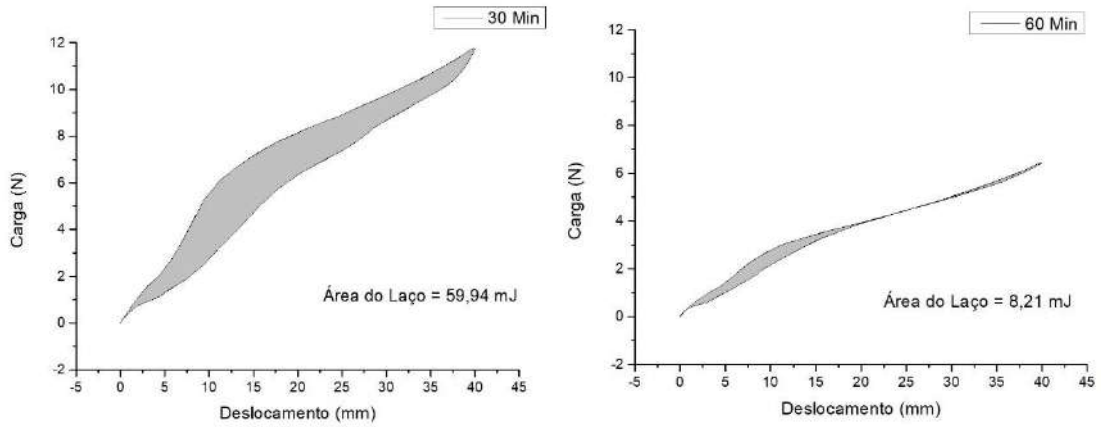
490ºC – Resfriamento ao Ar– Frequência 0.5 Hz – 0.0A



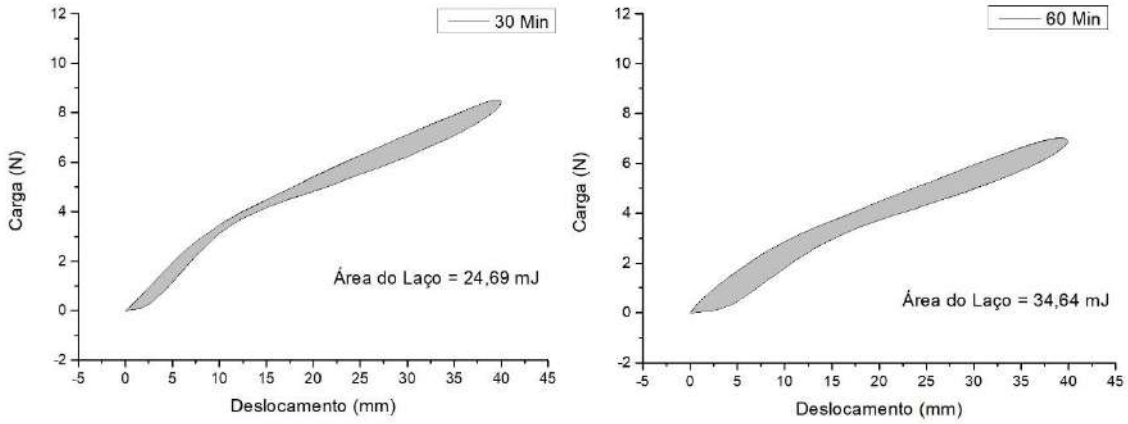
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



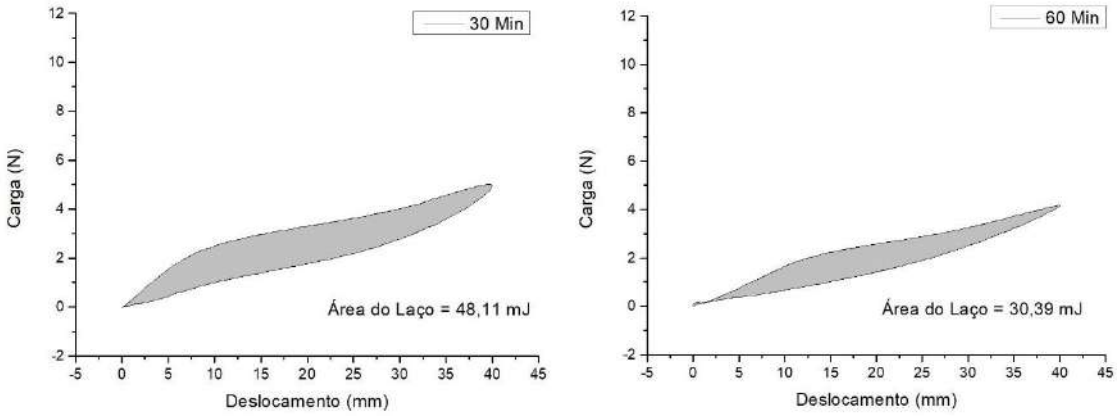
490ºC – Resfriamento ao Ar– Frequência 1.5 Hz – 0.0A



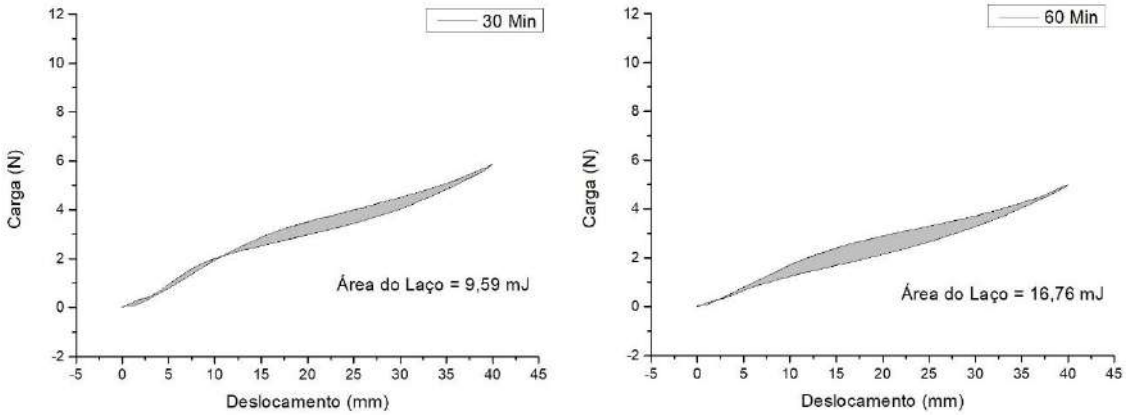
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



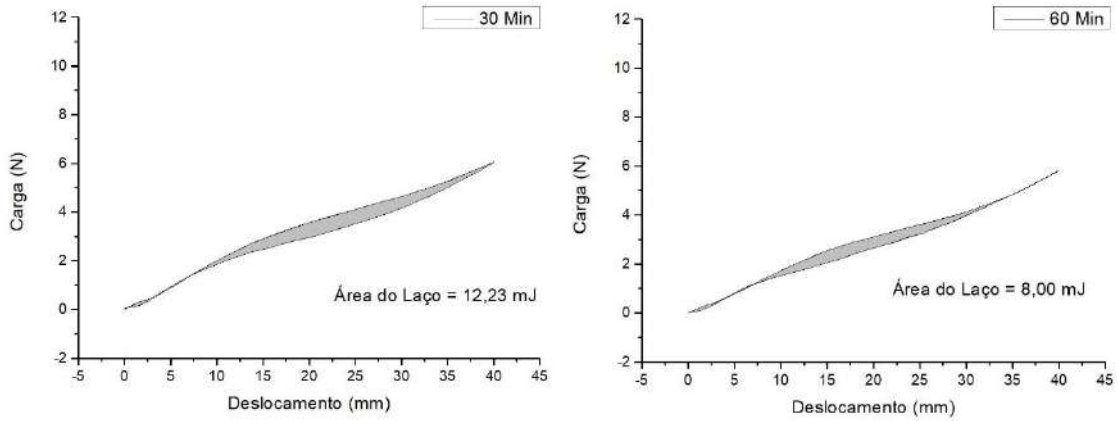
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



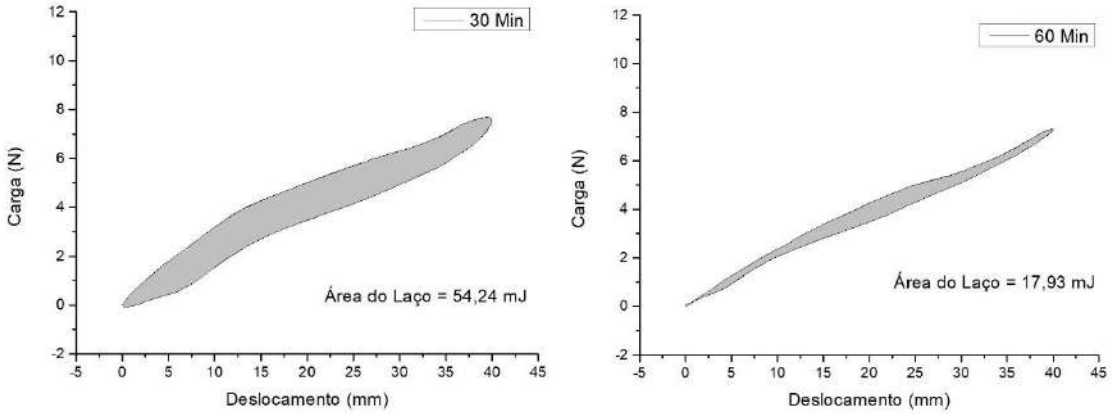
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



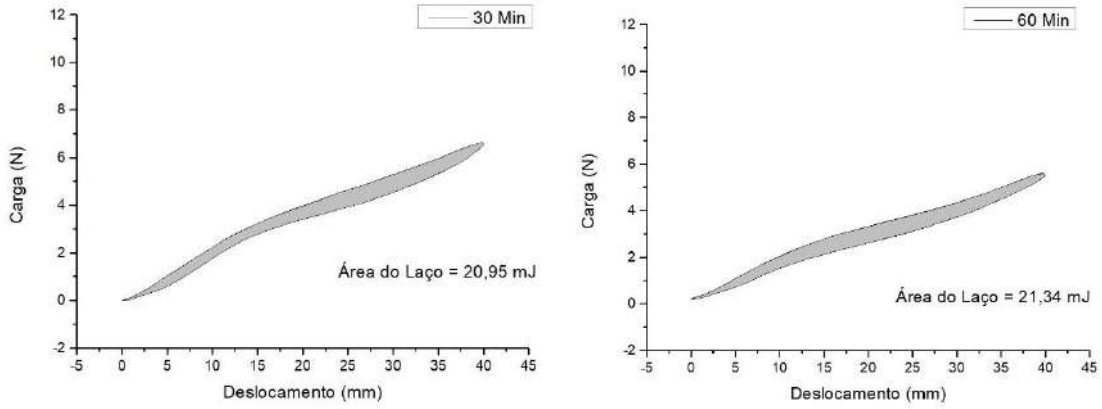
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



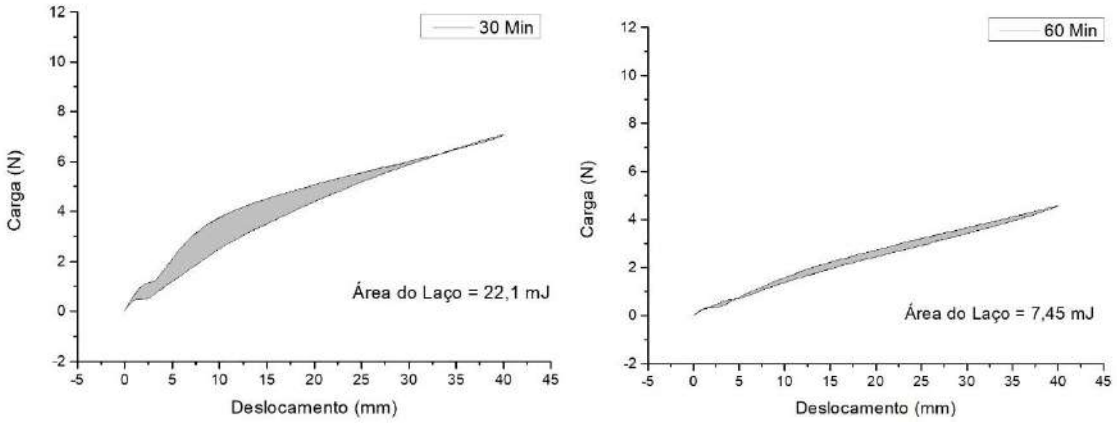
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



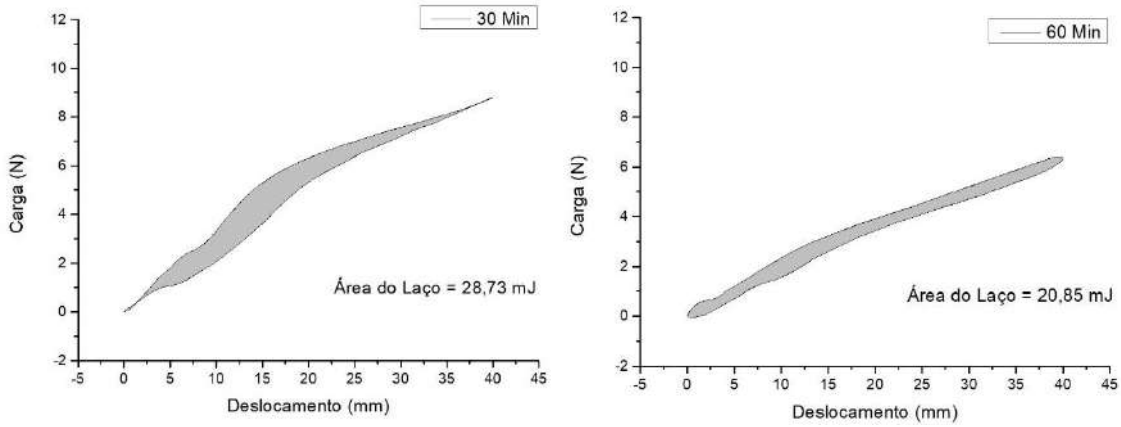
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



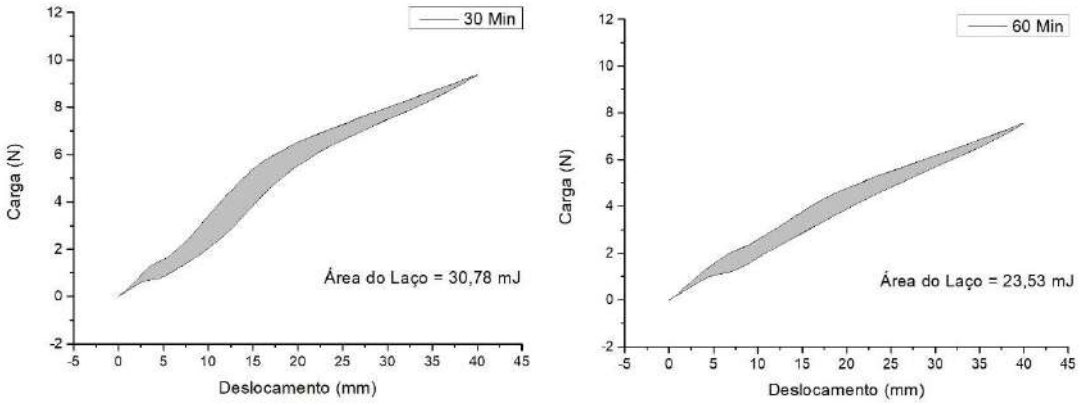
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



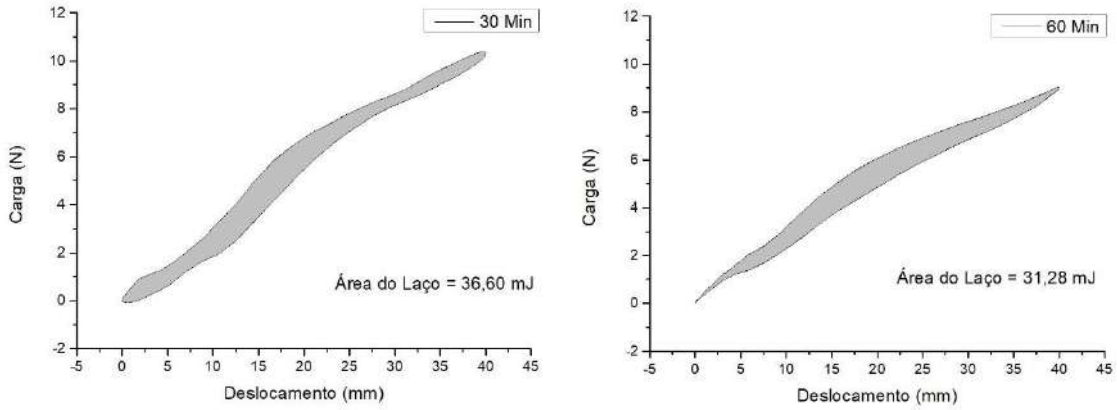
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



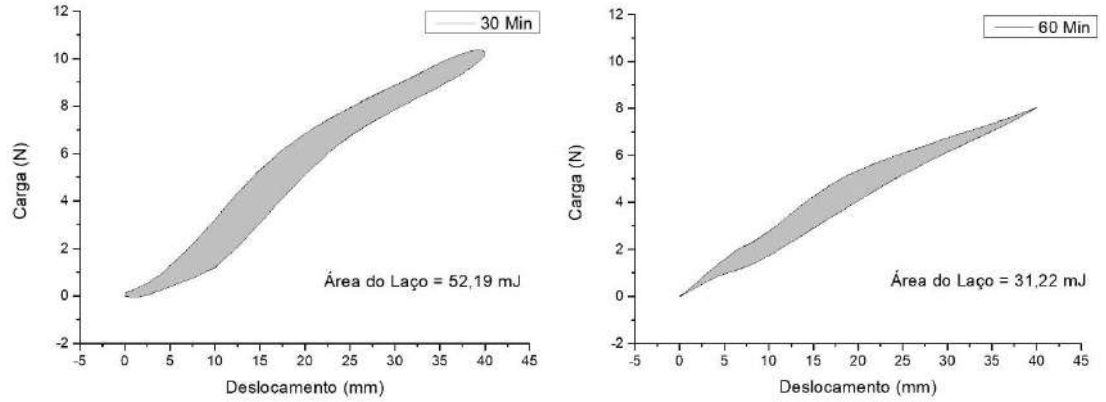
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



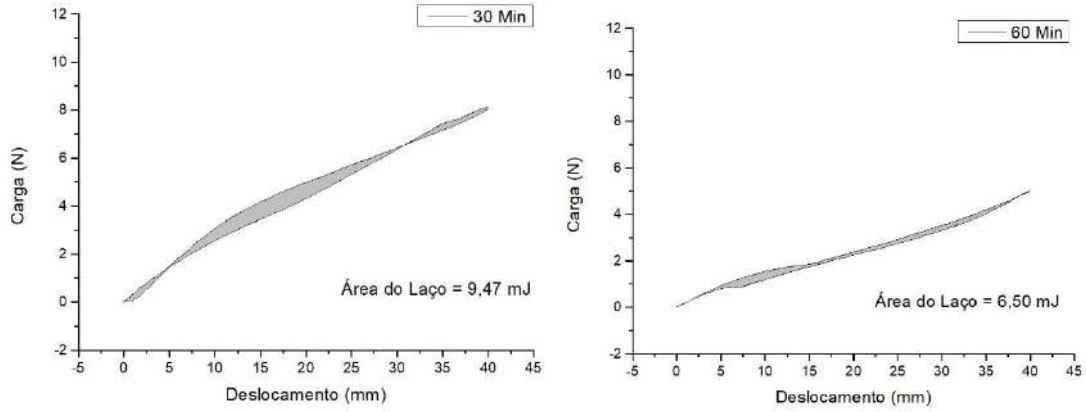
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



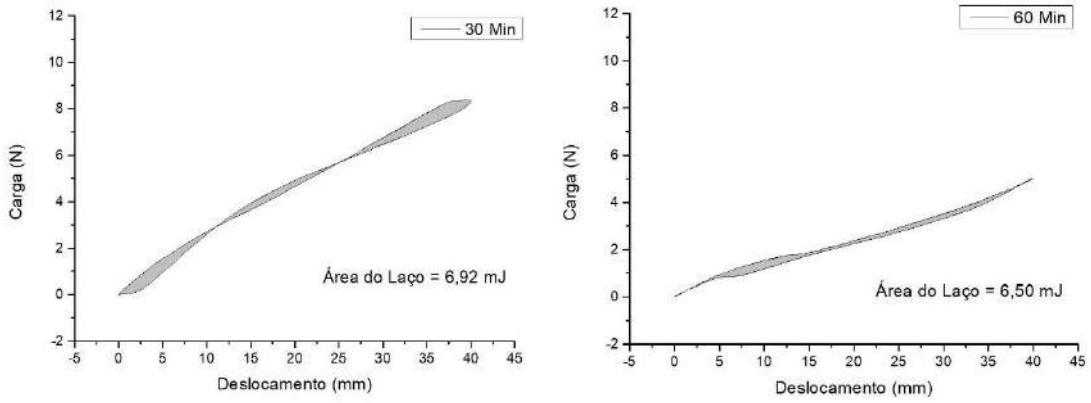
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



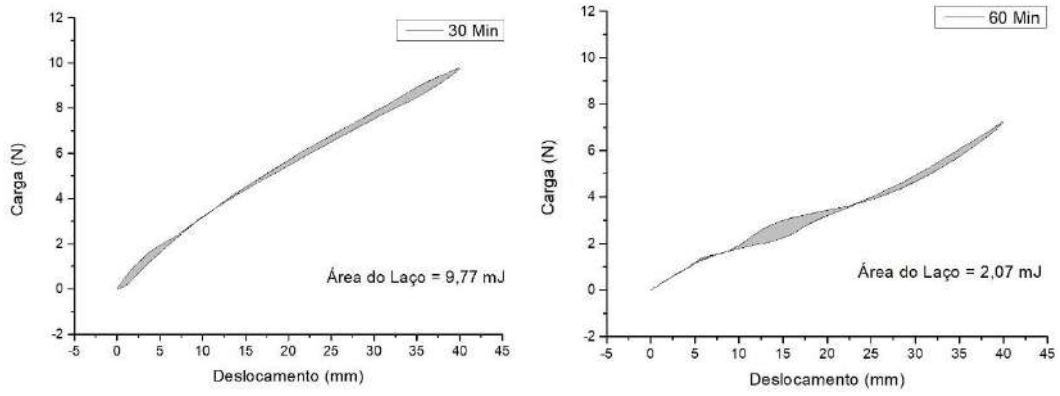
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



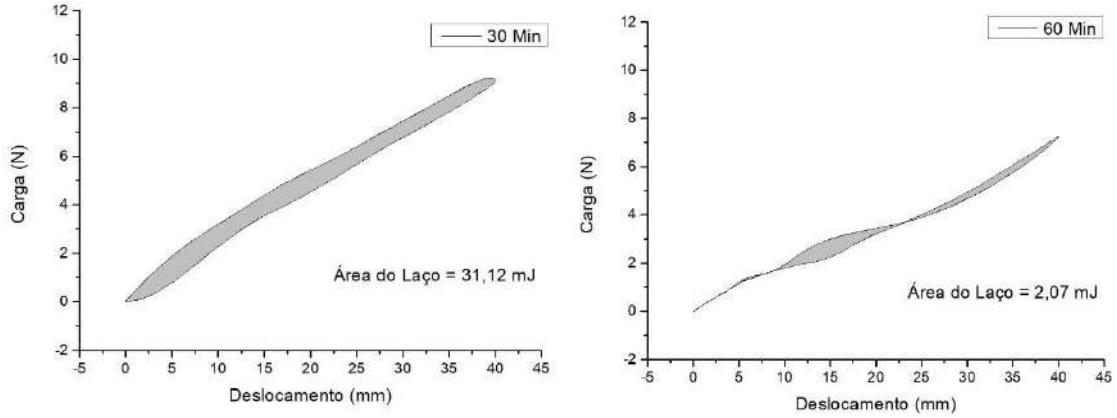
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



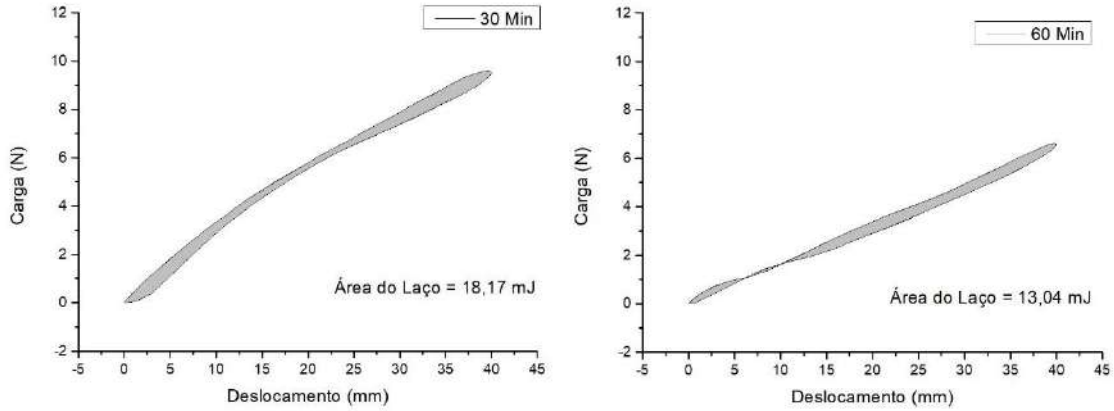
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



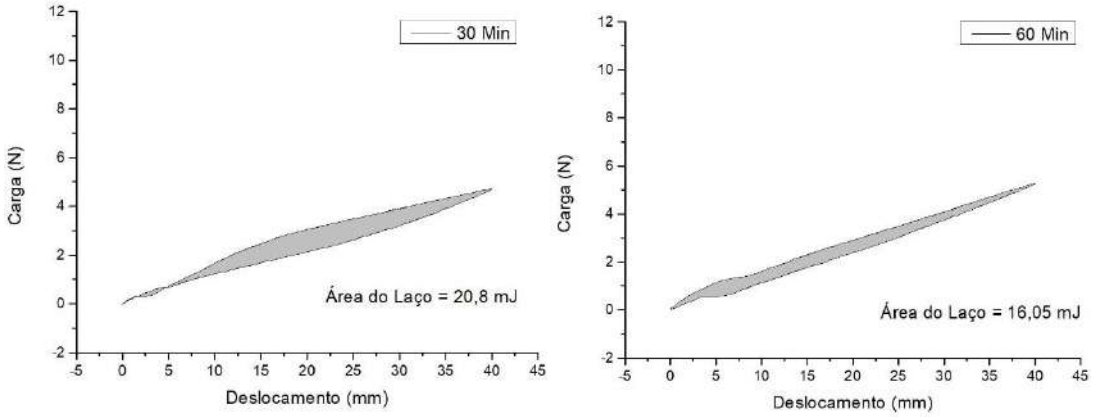
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



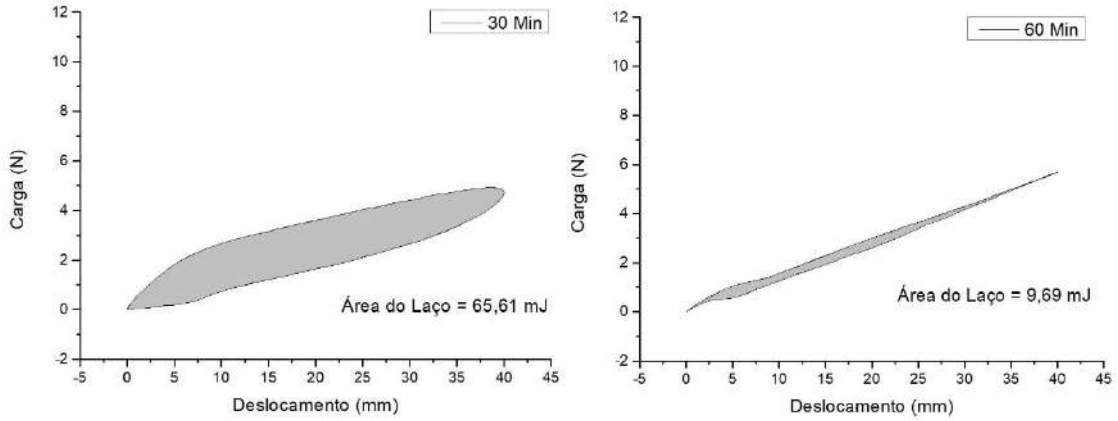
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



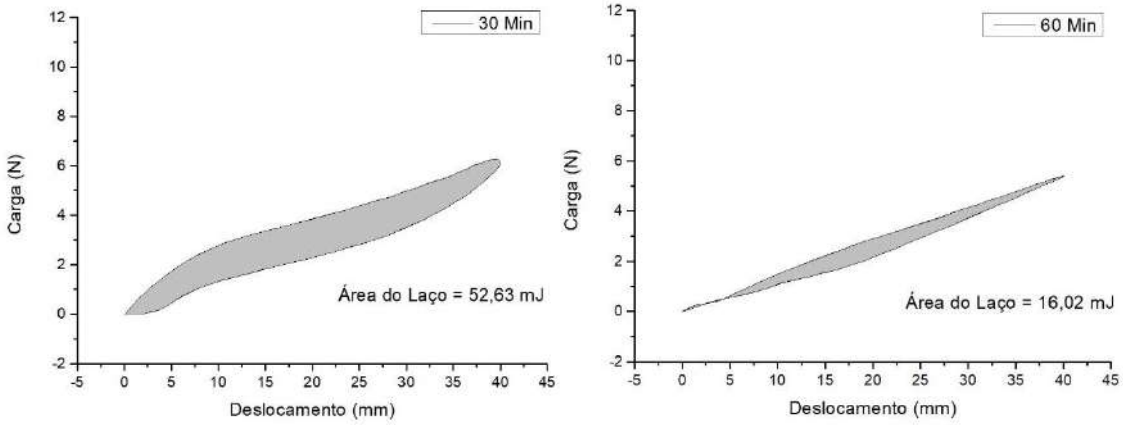
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



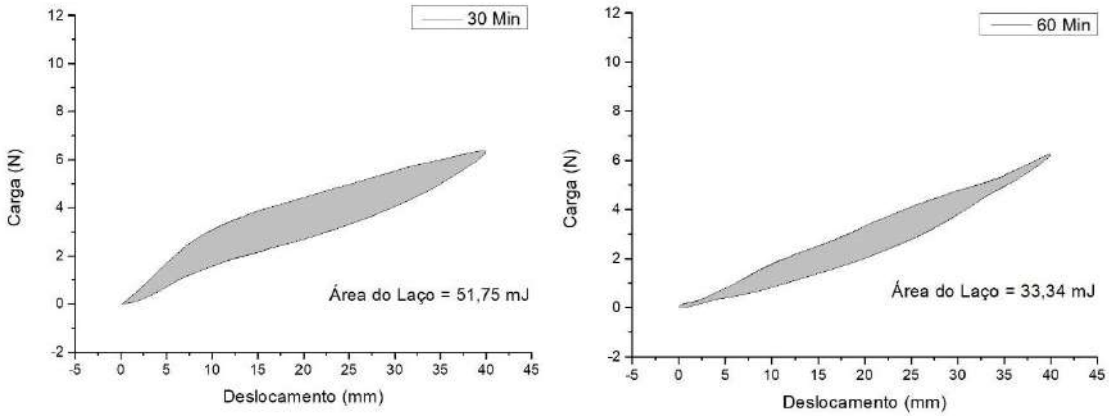
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 0.0A



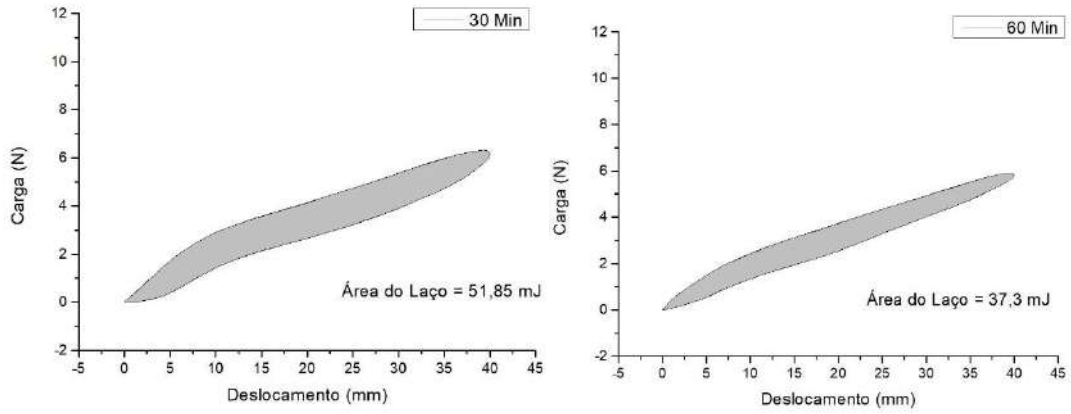
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 0.0A



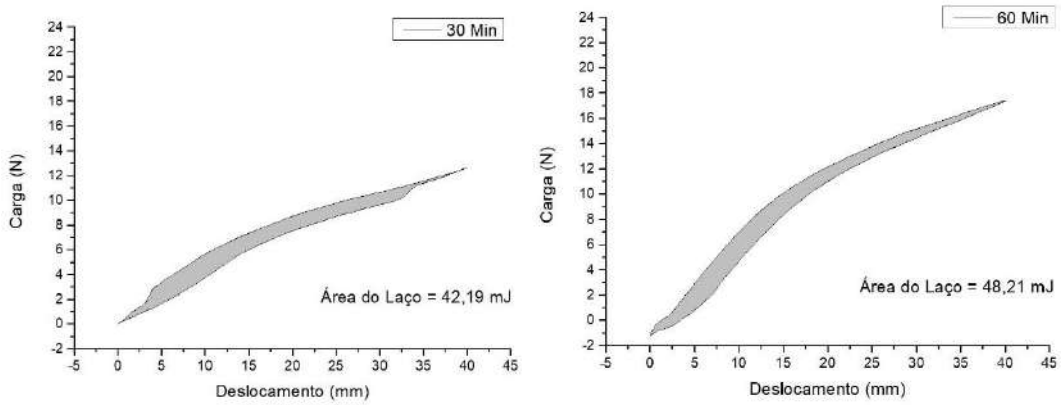
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 0.0A



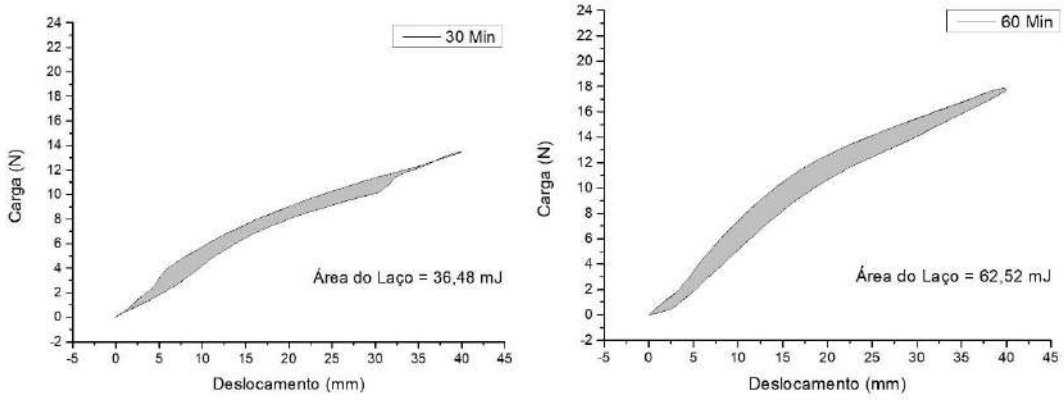
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 0.0A



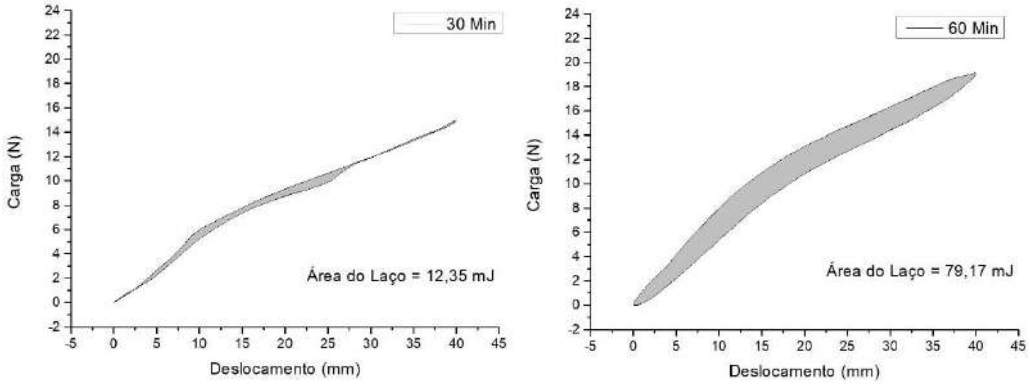
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 0.0A



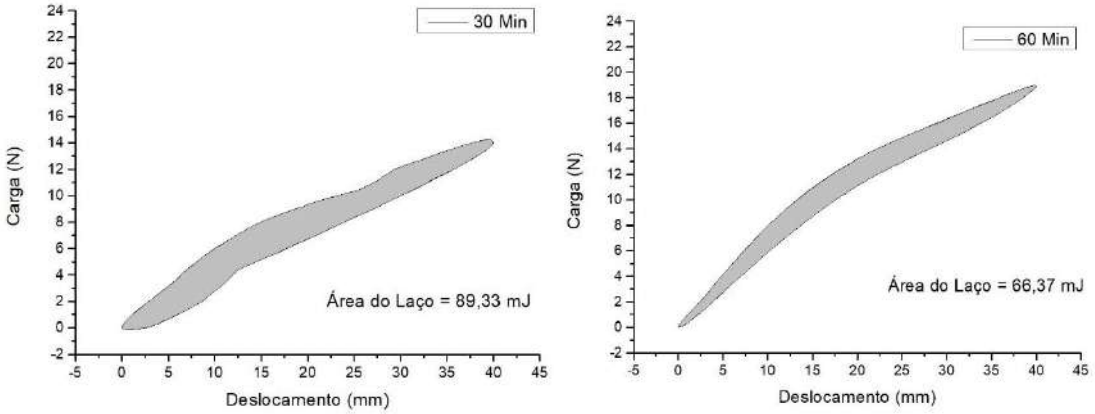
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



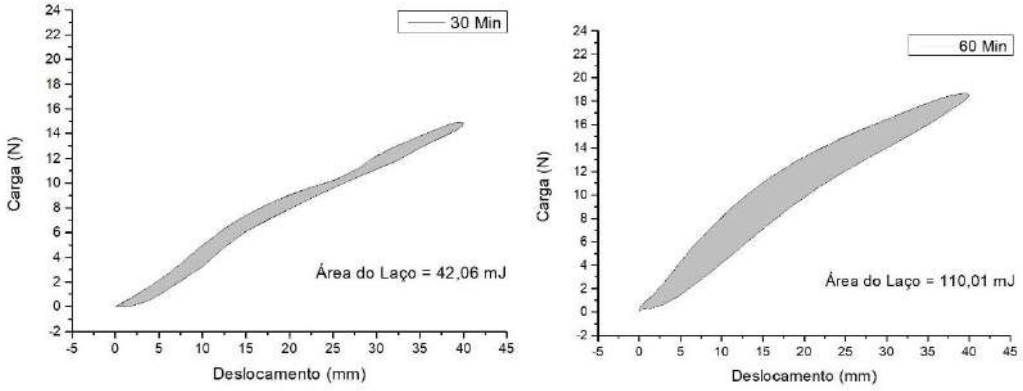
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 1.5A



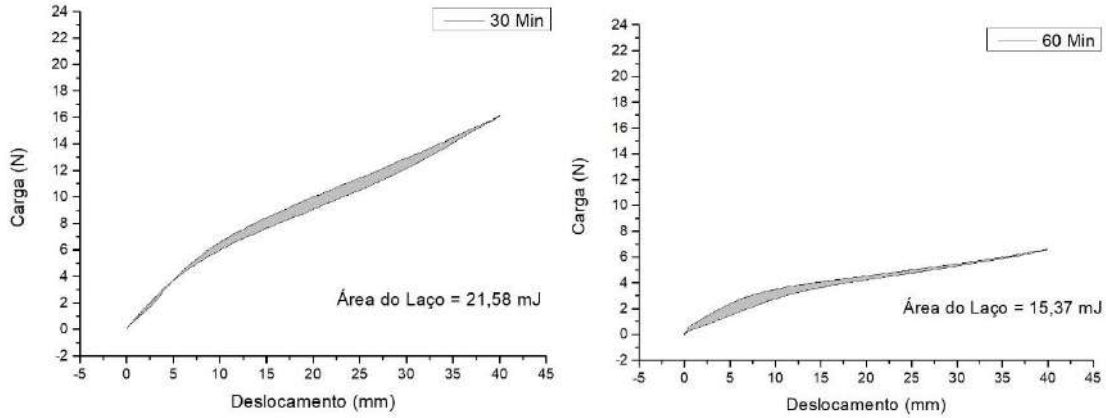
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



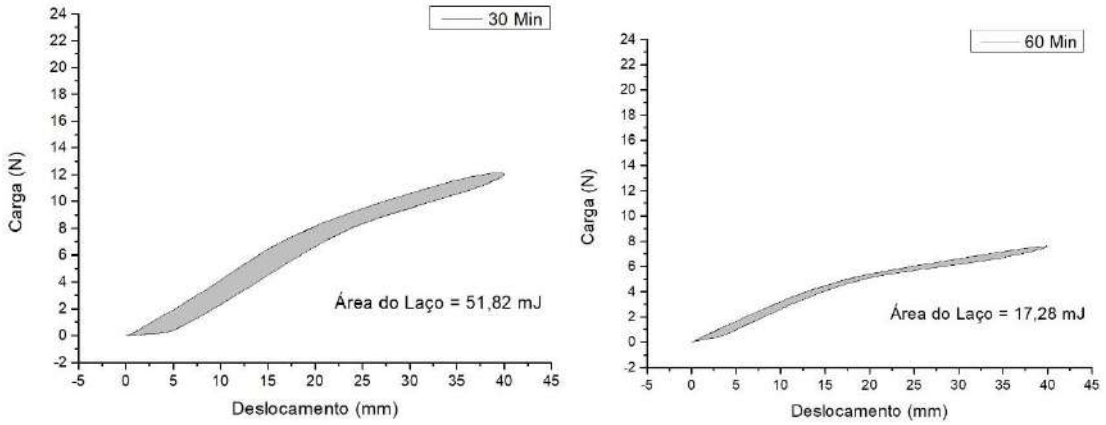
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



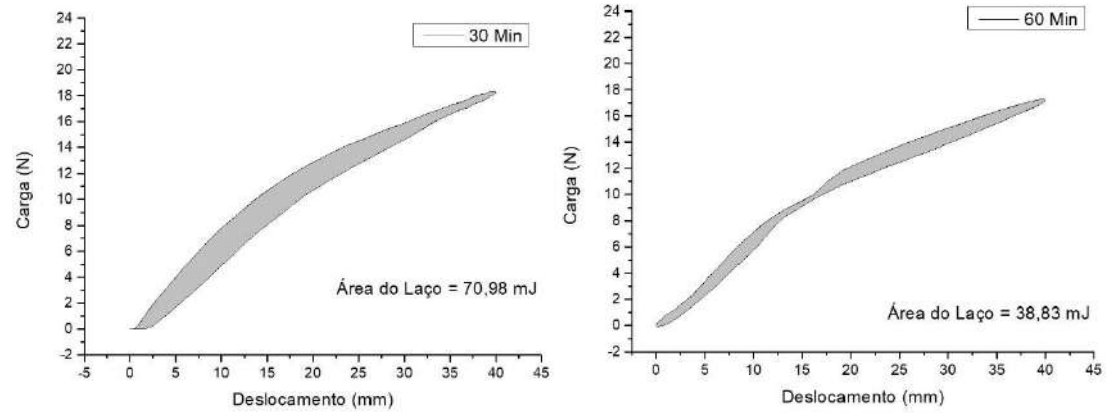
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



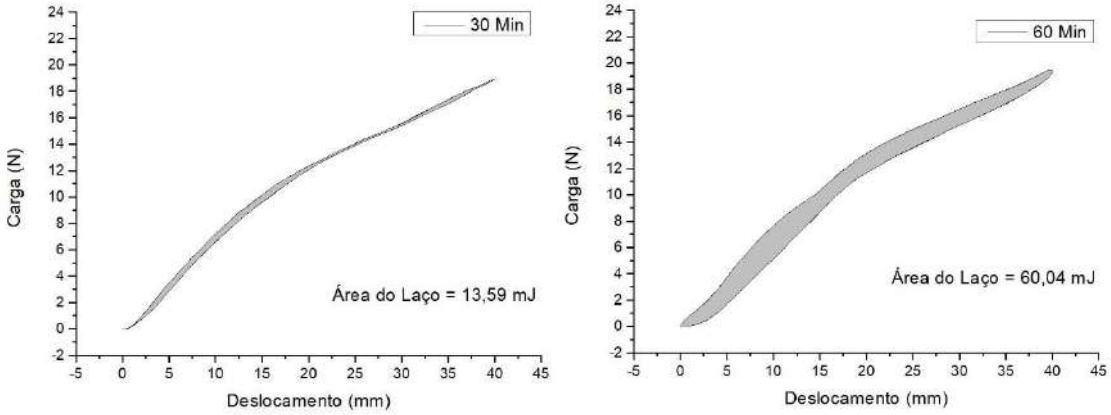
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



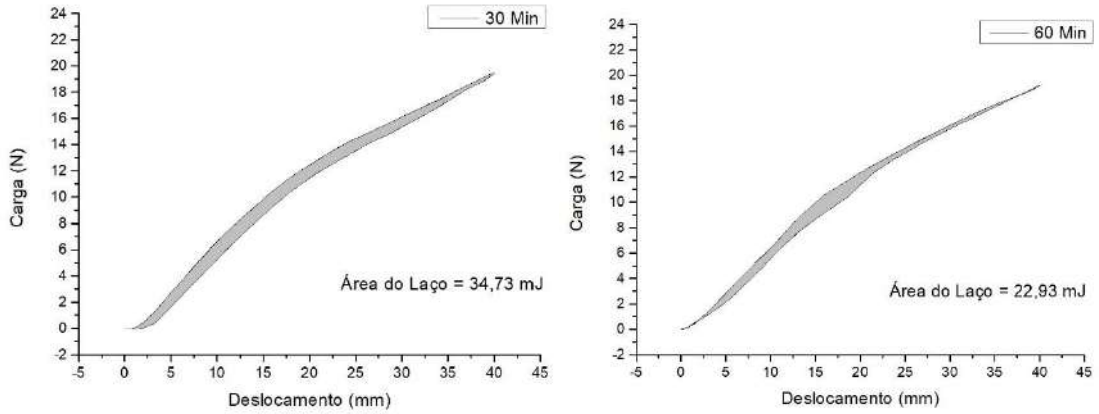
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.0 Hz – 1.5A



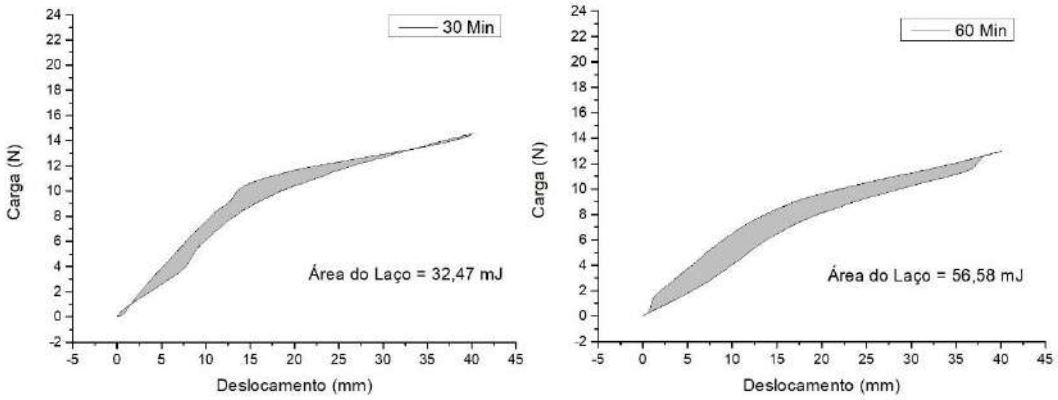
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



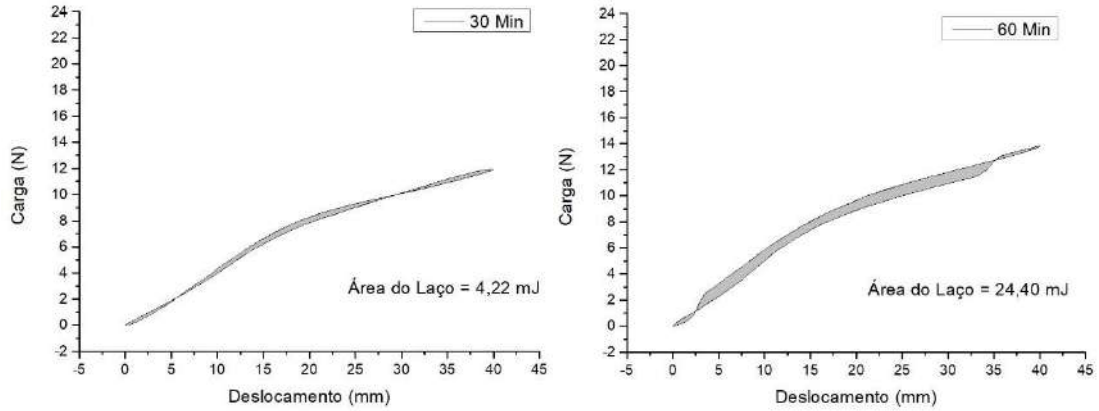
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



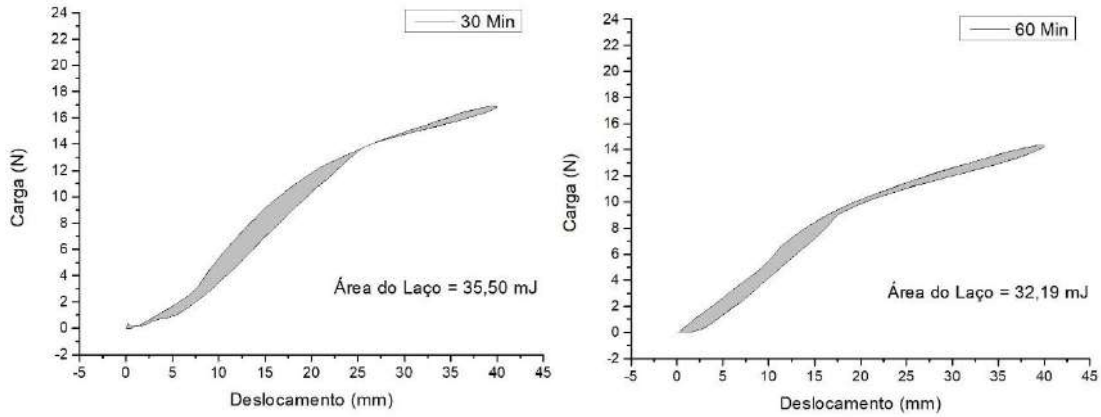
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



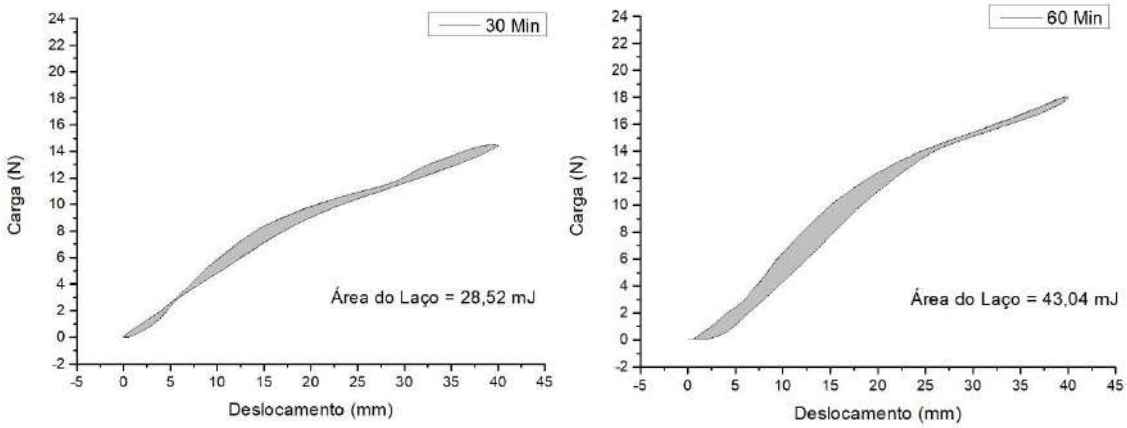
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



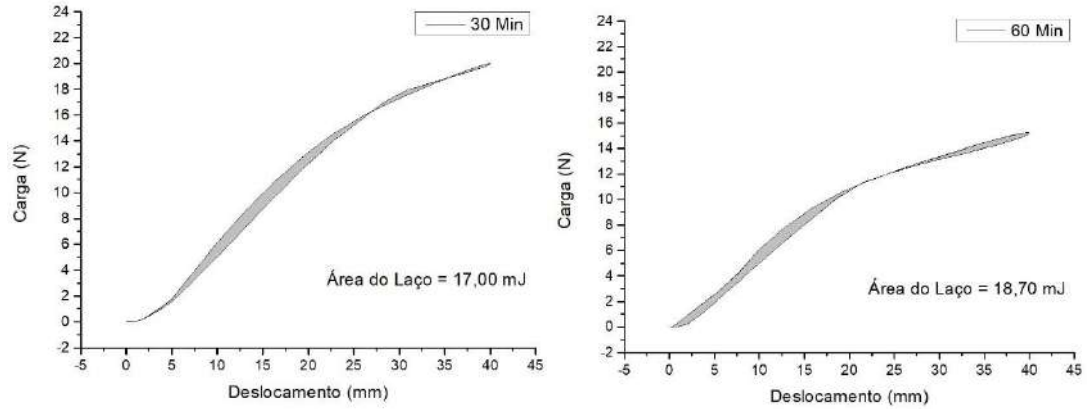
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 1.5A



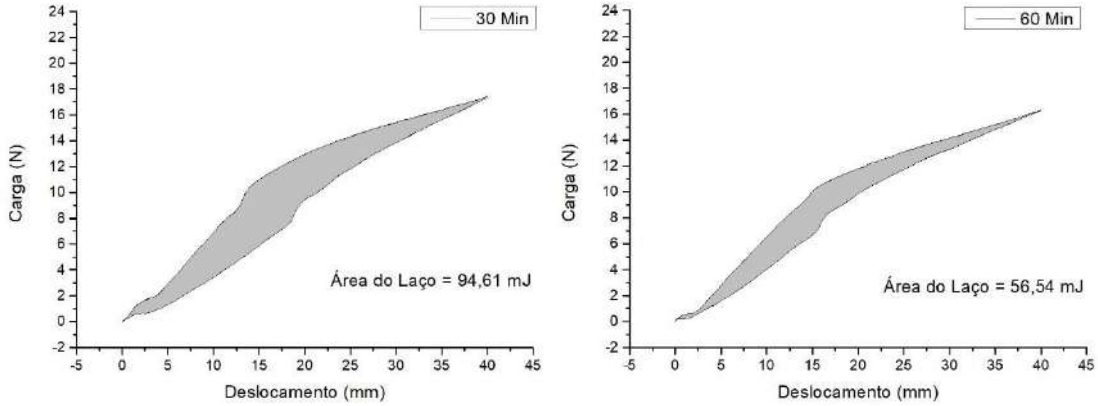
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



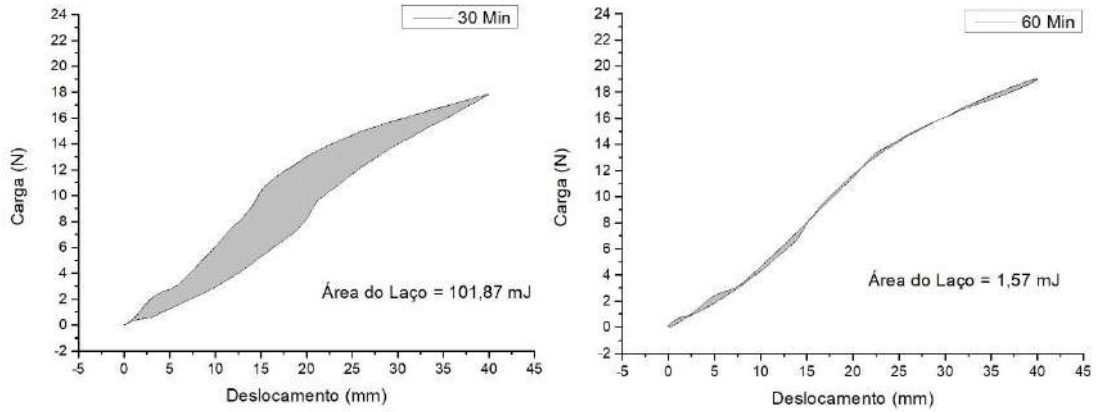
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



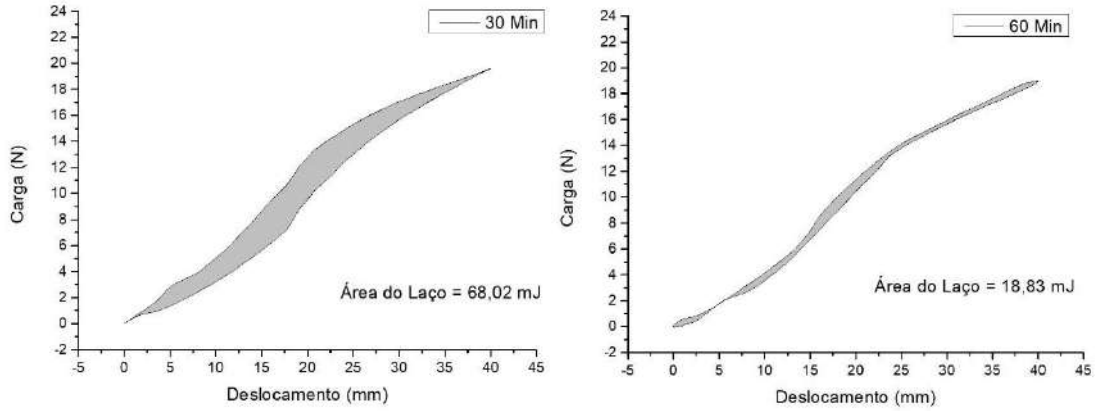
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



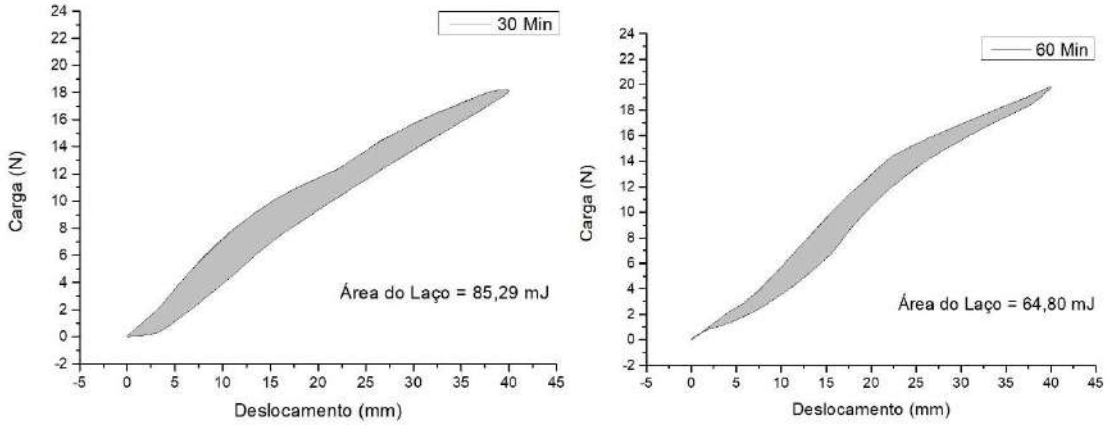
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



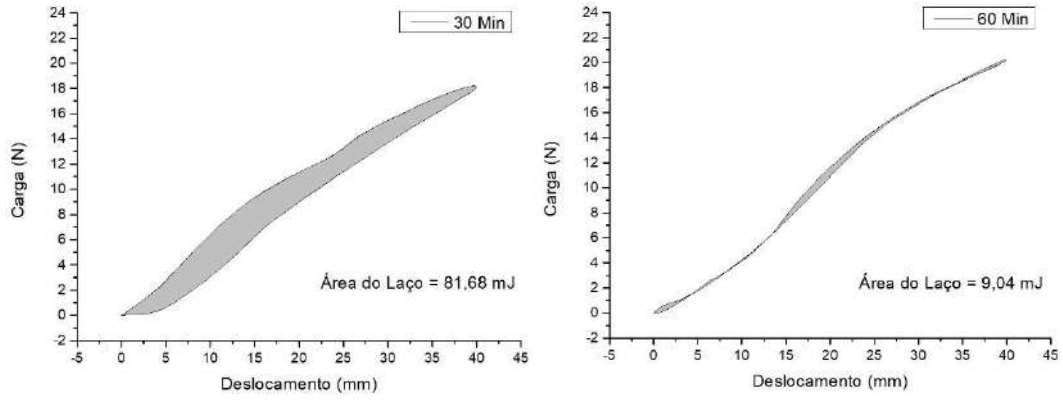
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 1.5A



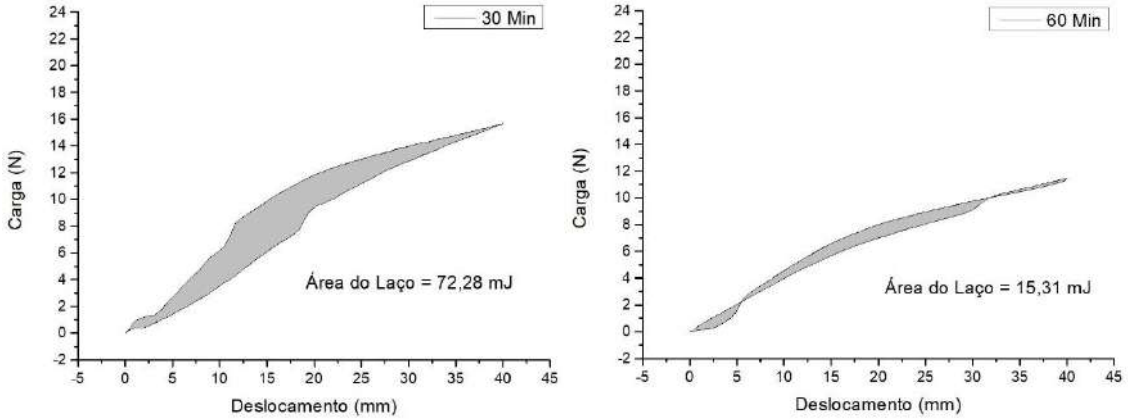
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



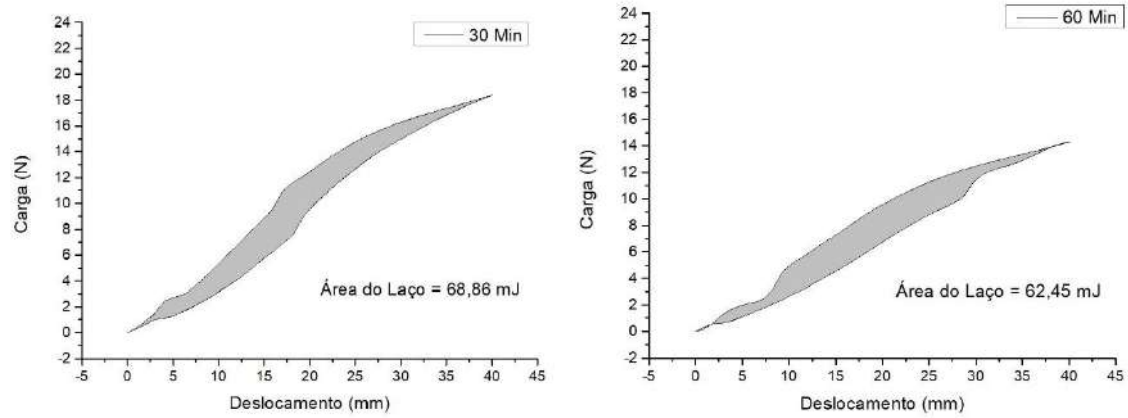
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



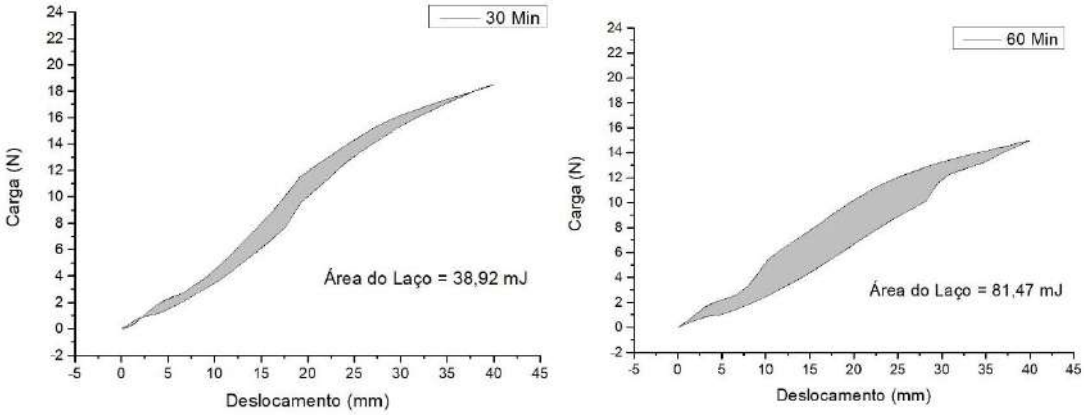
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



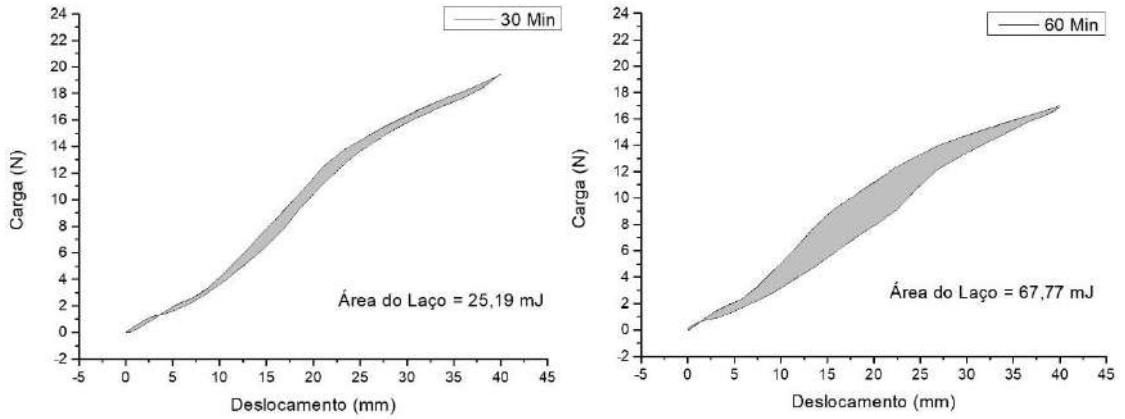
490ºC – Resfriamento ao Ar– Frequência 0.5 Hz – 1.5A



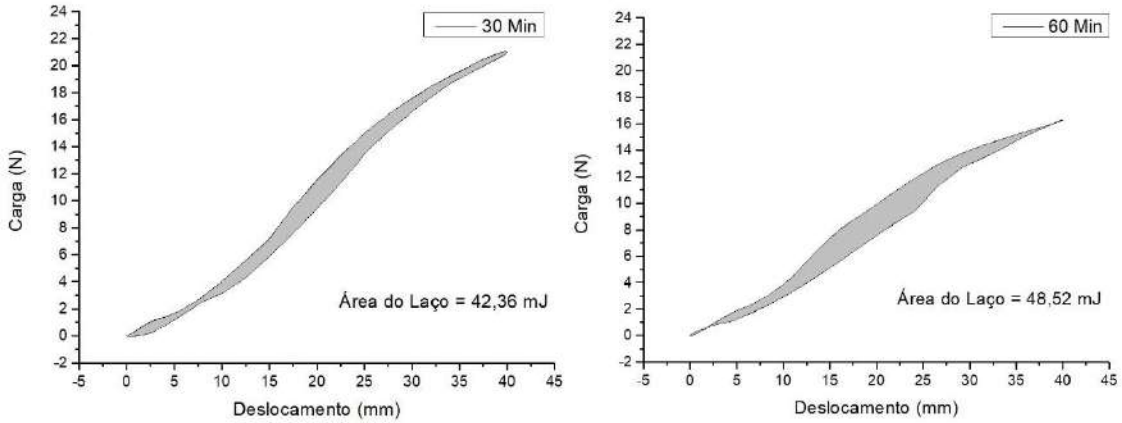
490ºC – Resfriamento ao Ar– Frequência 1.0 Hz – 1.5A



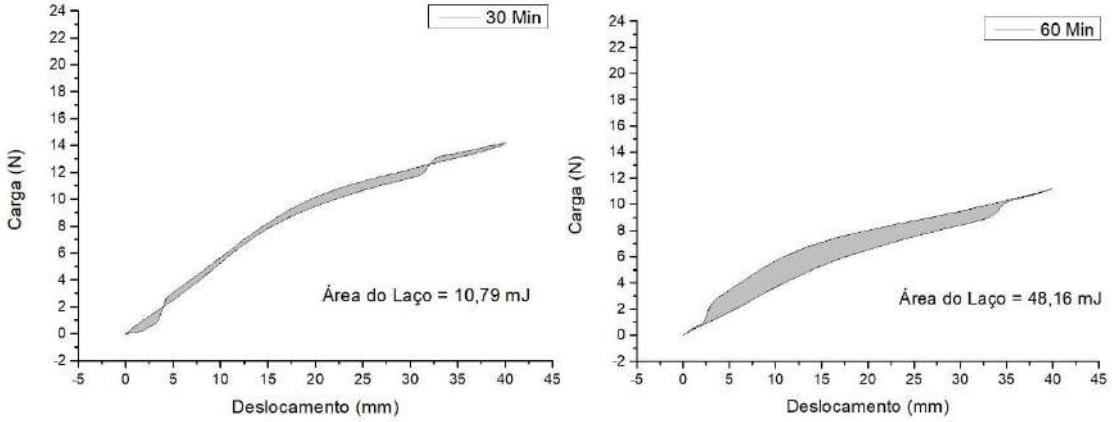
490ºC – Resfriamento ao Ar– Frequência 1.5 Hz – 1.5A



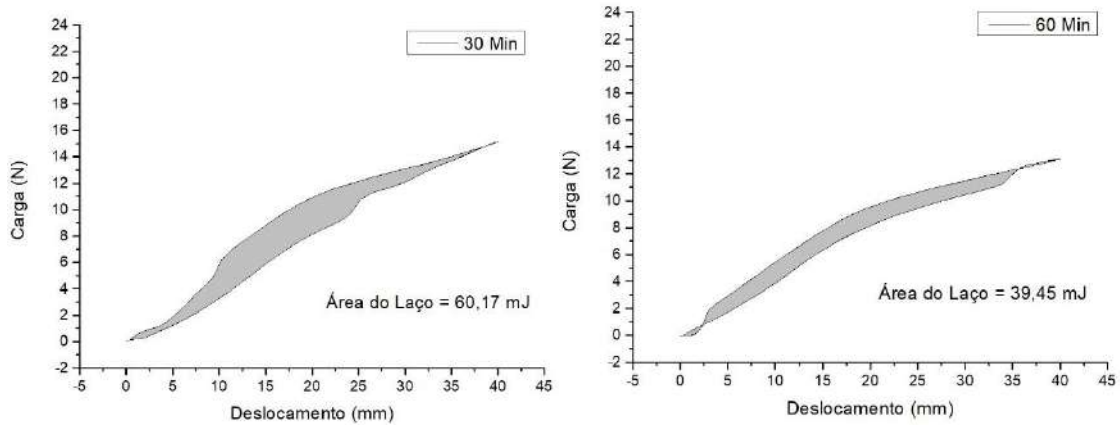
490ºC – Resfriamento ao Ar– Frequência 2.0 Hz – 1.5A



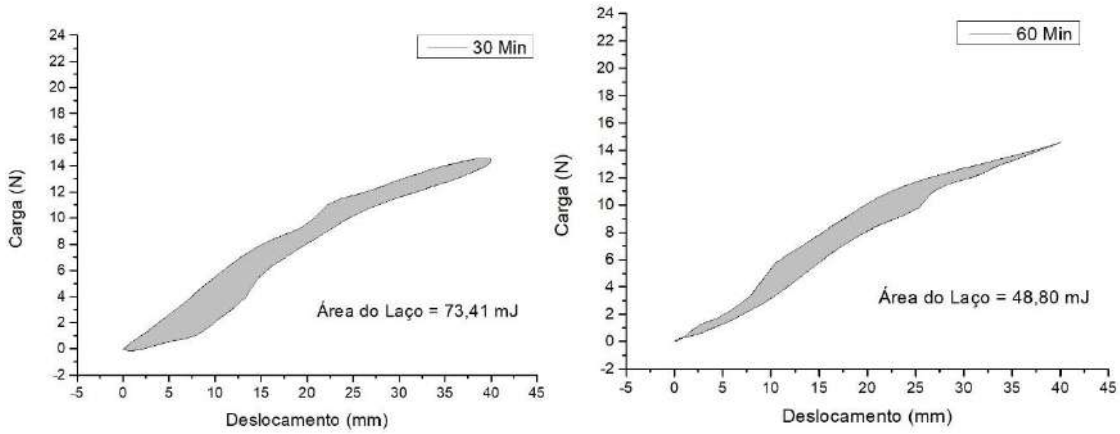
490ºC – Resfriamento ao Ar– Frequência 2.5 Hz – 1.5A



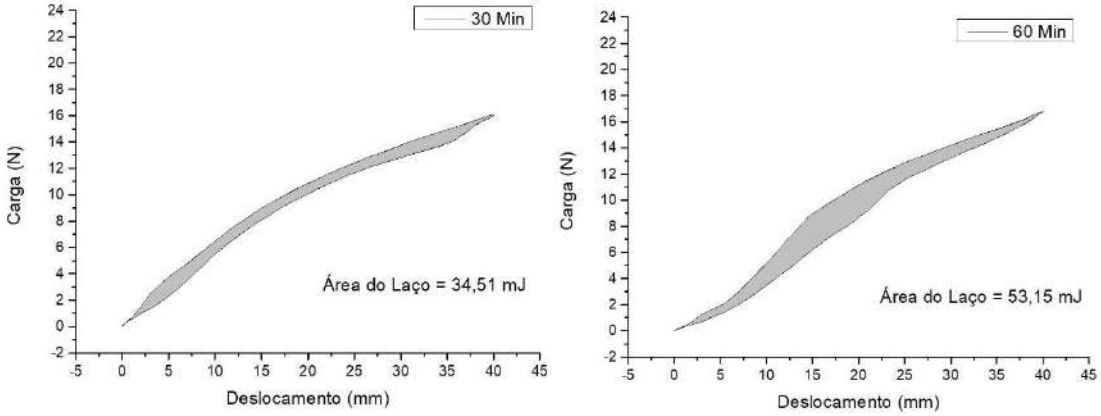
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



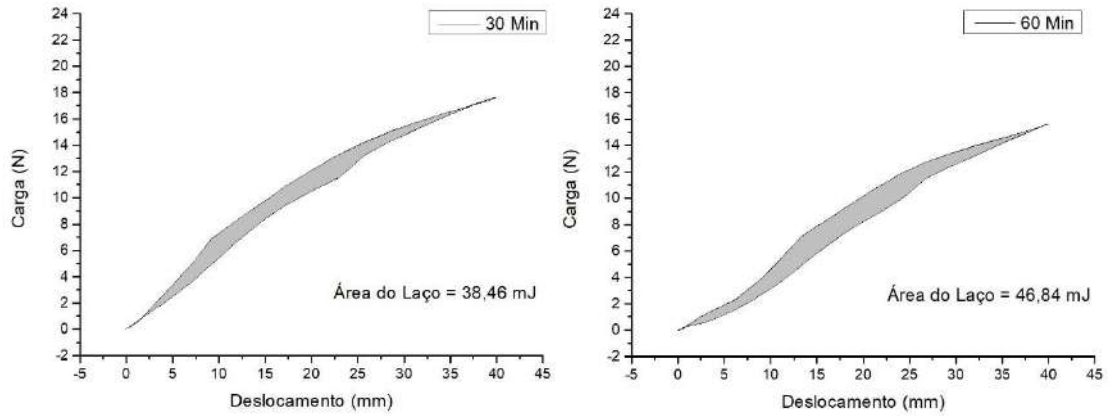
490ºC – Resfriamento no Forno– Frequência 1.0 Hz – 1.5A



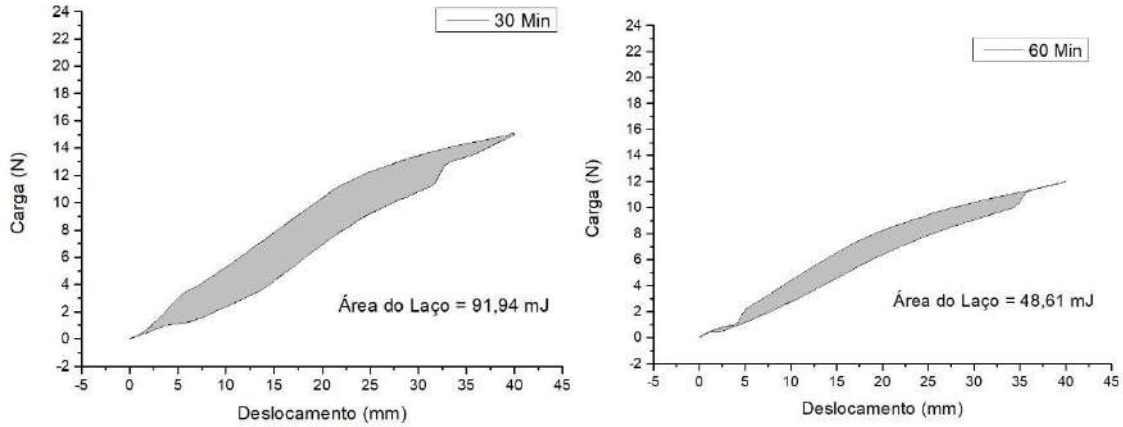
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



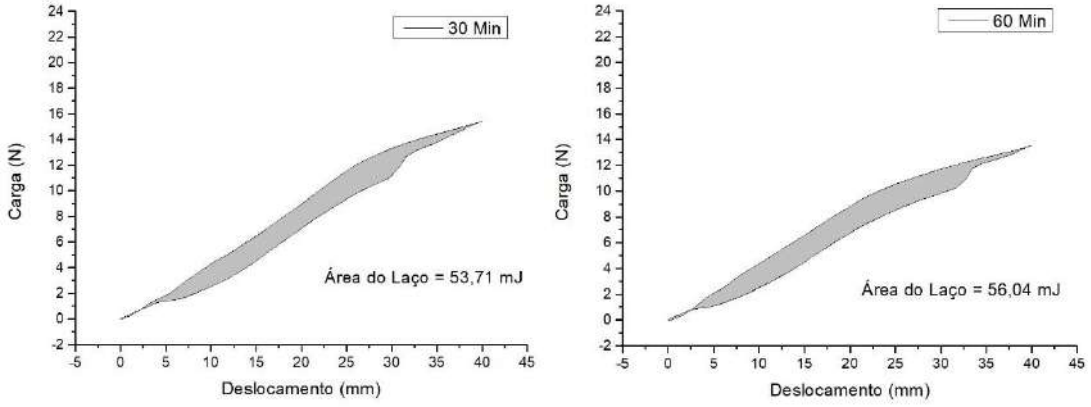
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



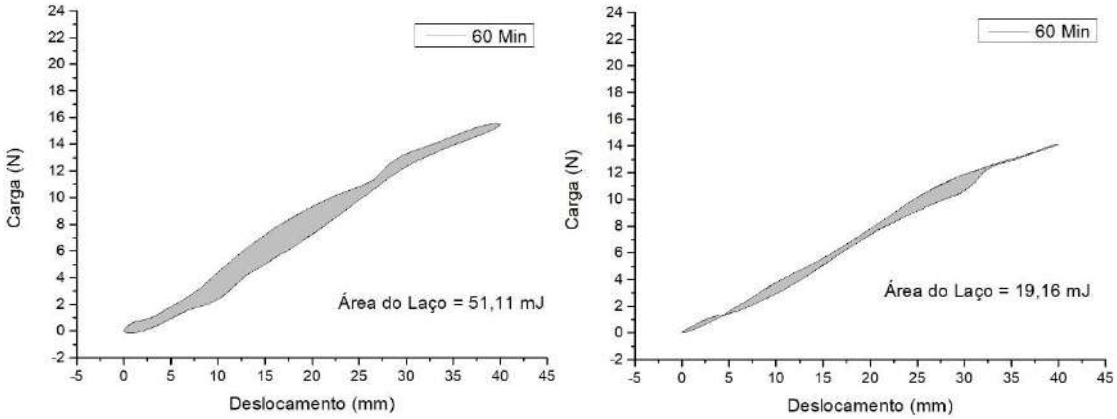
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



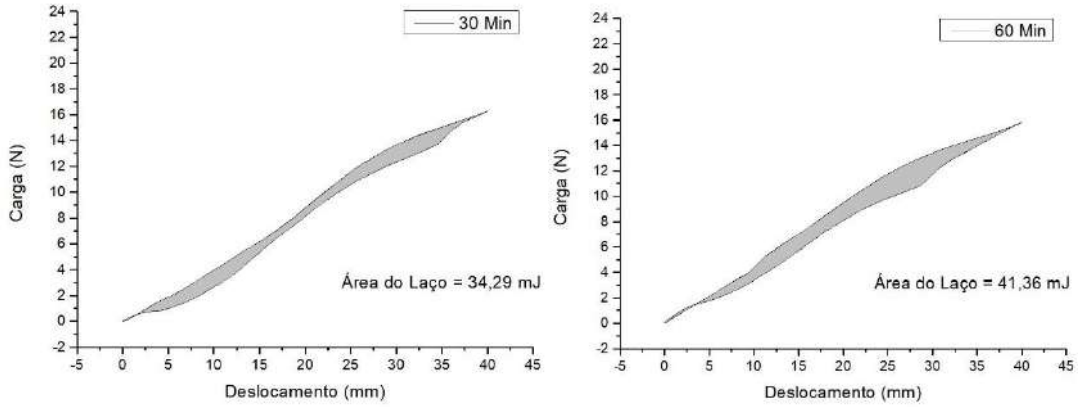
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



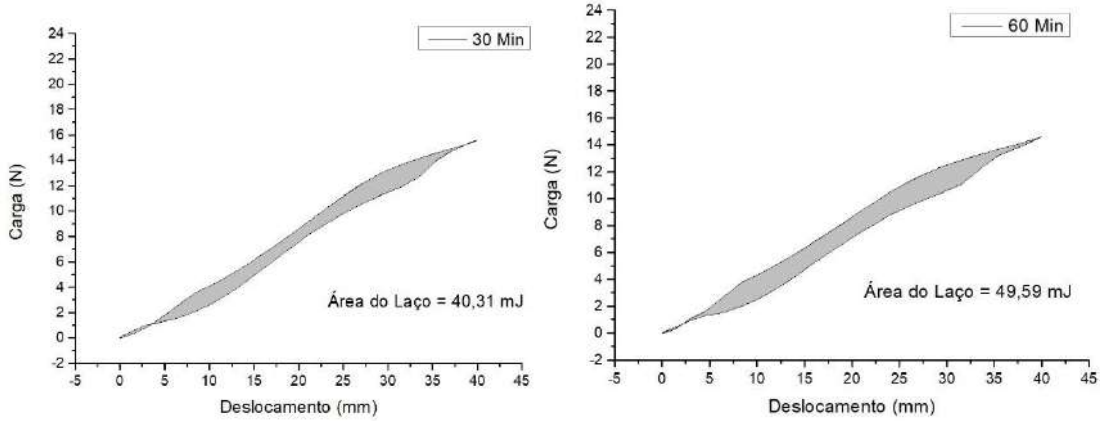
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 1.5A



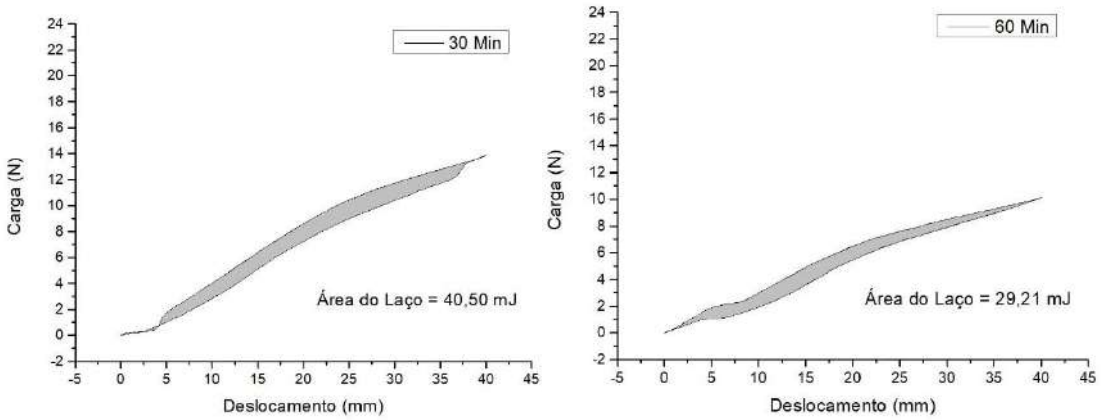
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



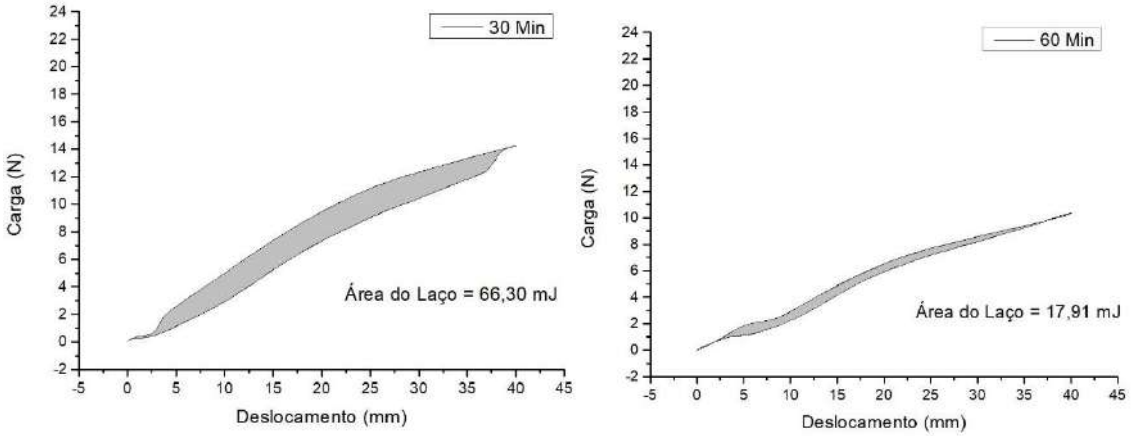
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



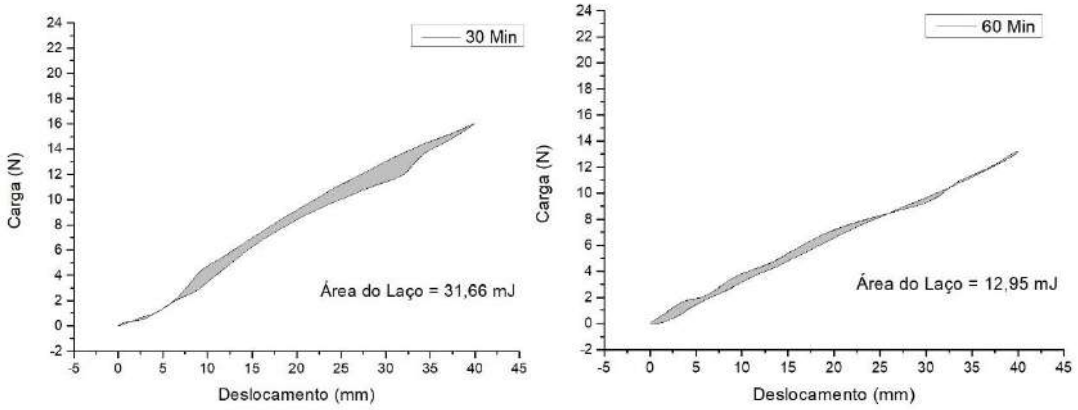
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



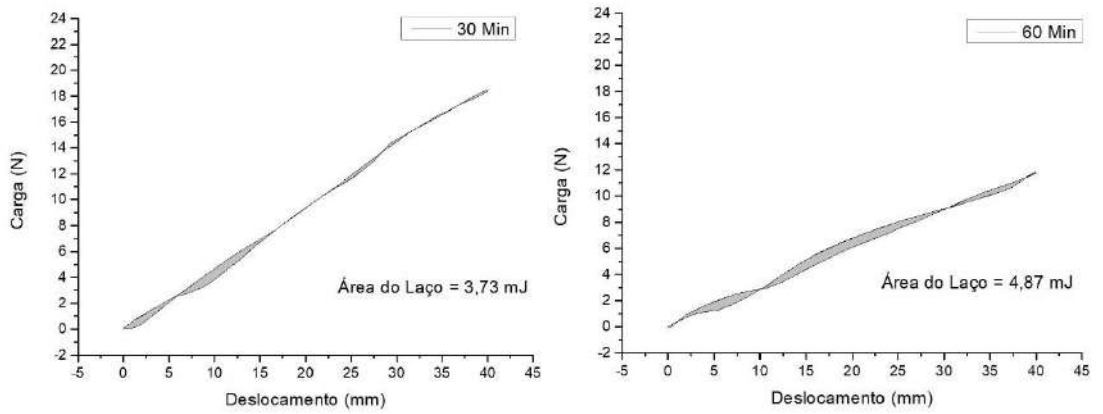
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



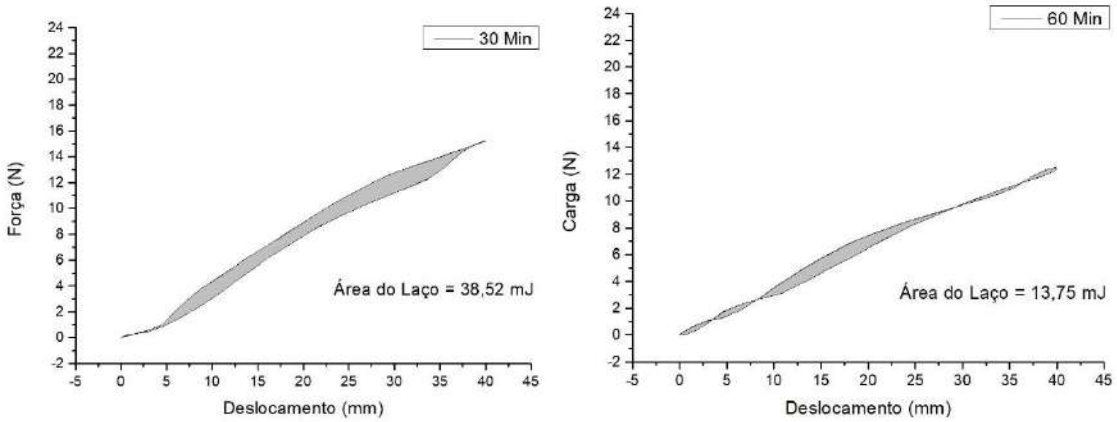
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.0 Hz – 1.5A



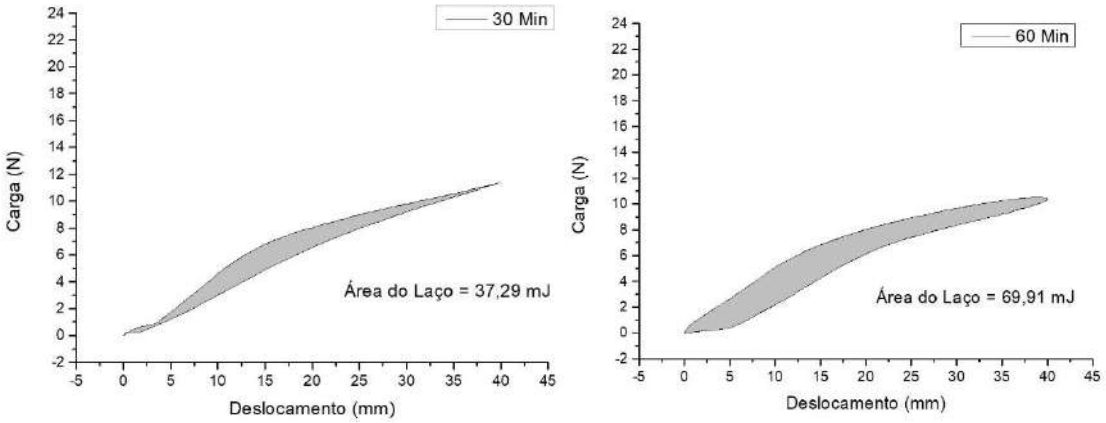
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



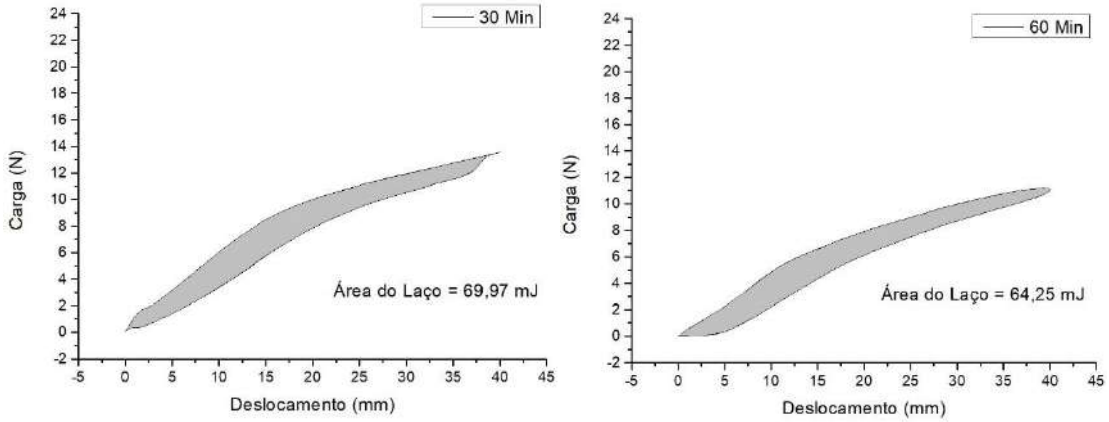
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



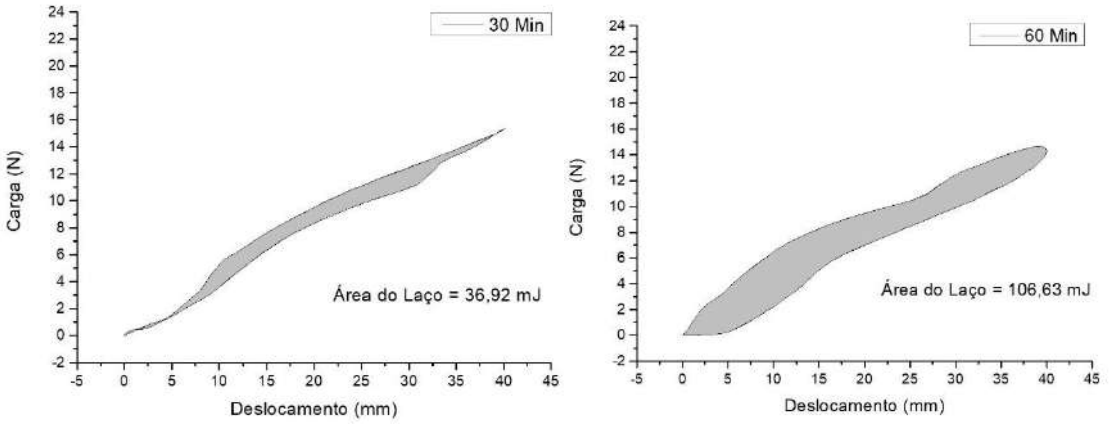
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



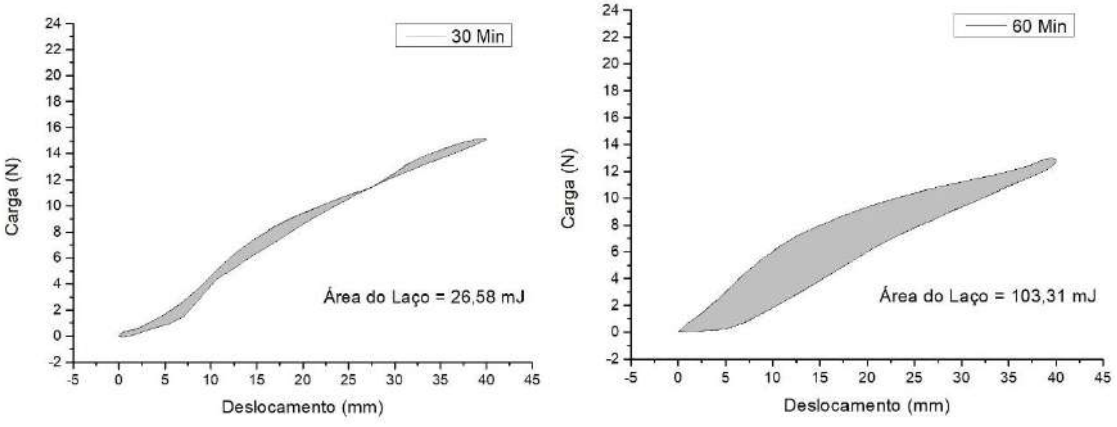
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 1.5A



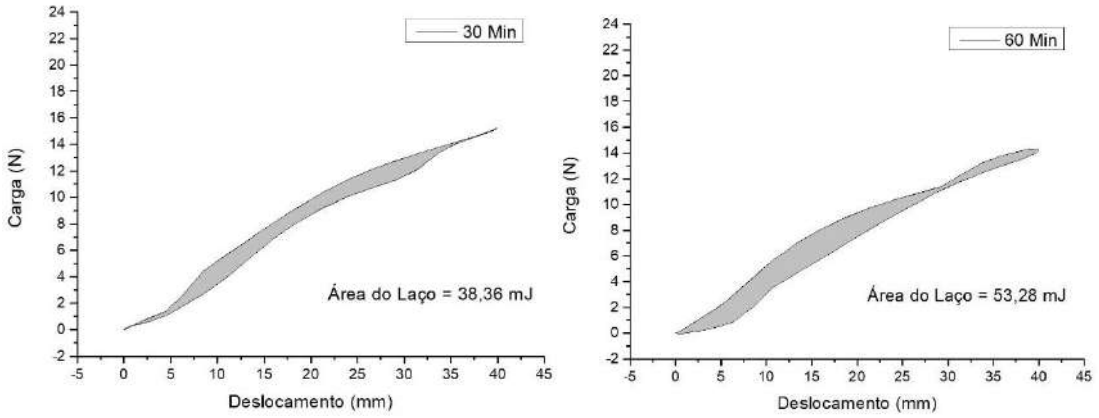
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 1.5A



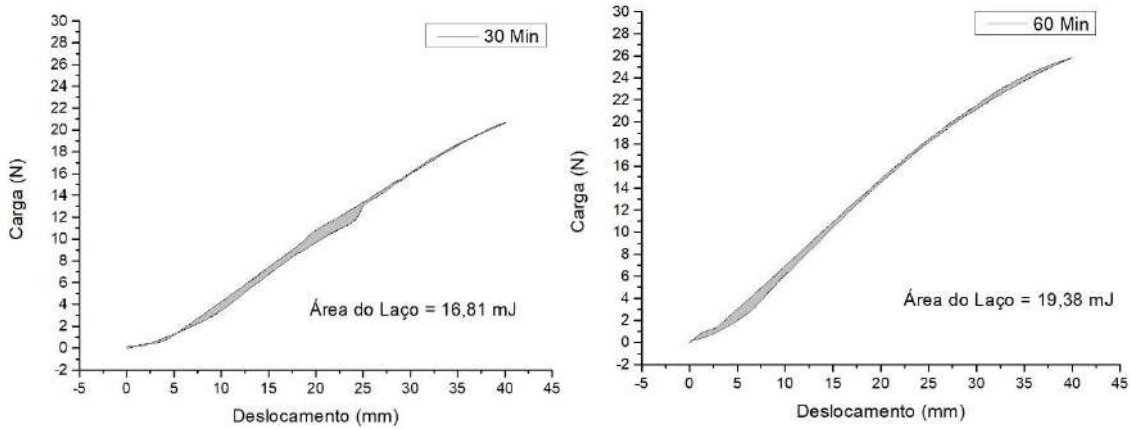
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 1.5A



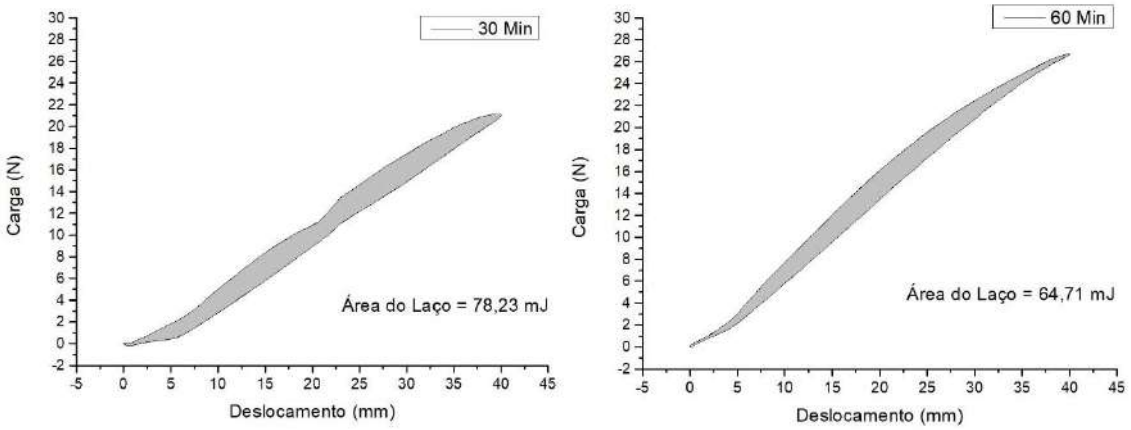
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 1.5A



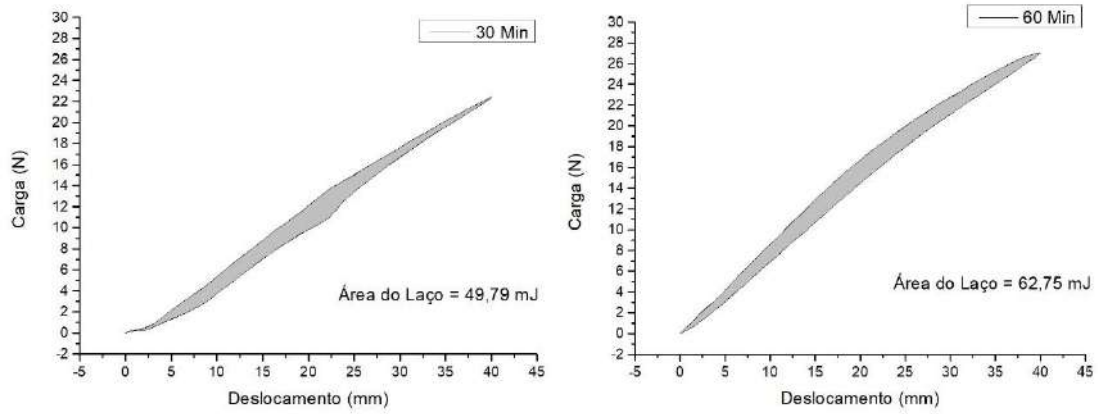
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 1.5A



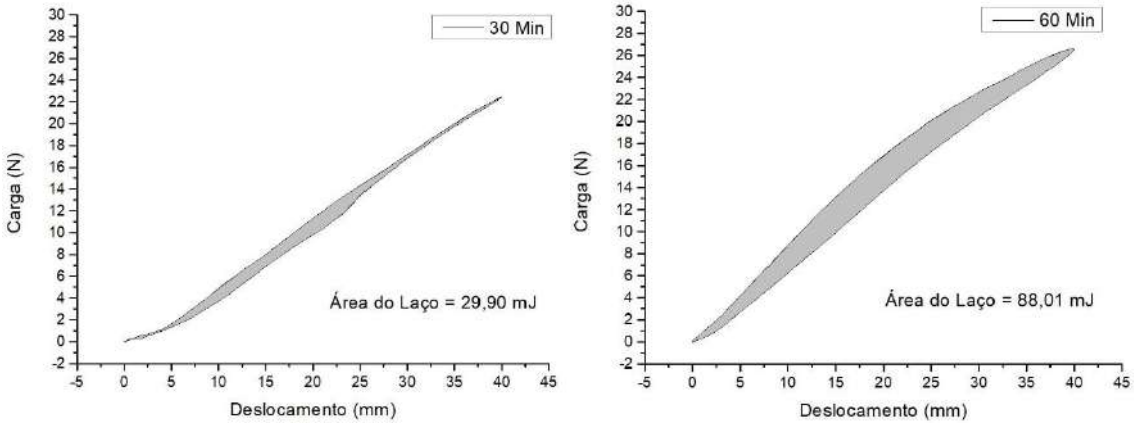
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



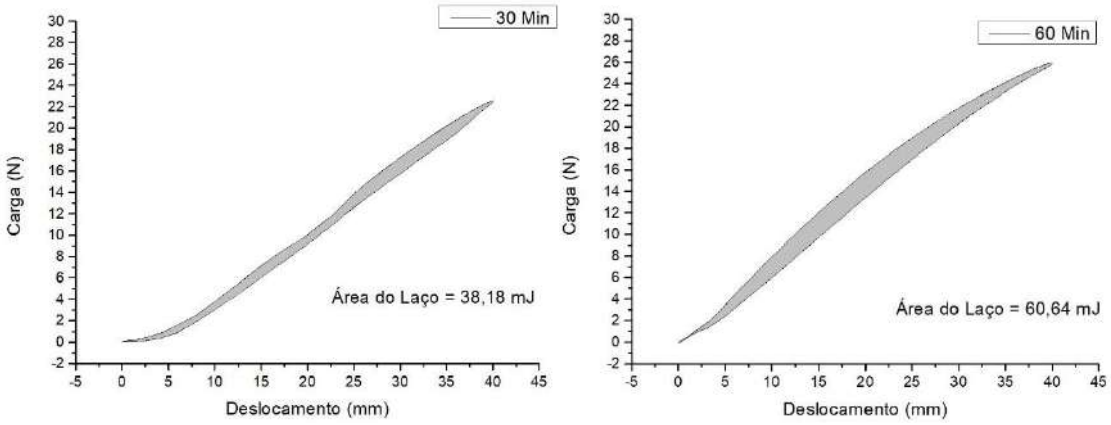
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



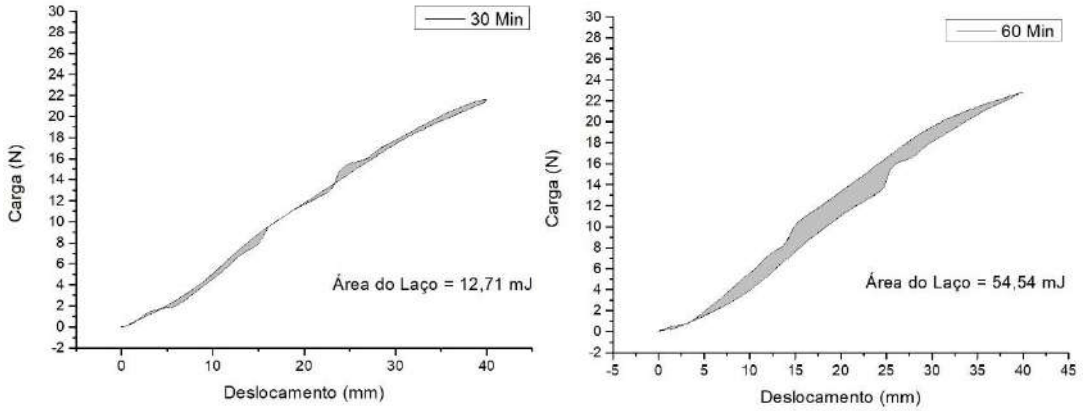
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 2.5A



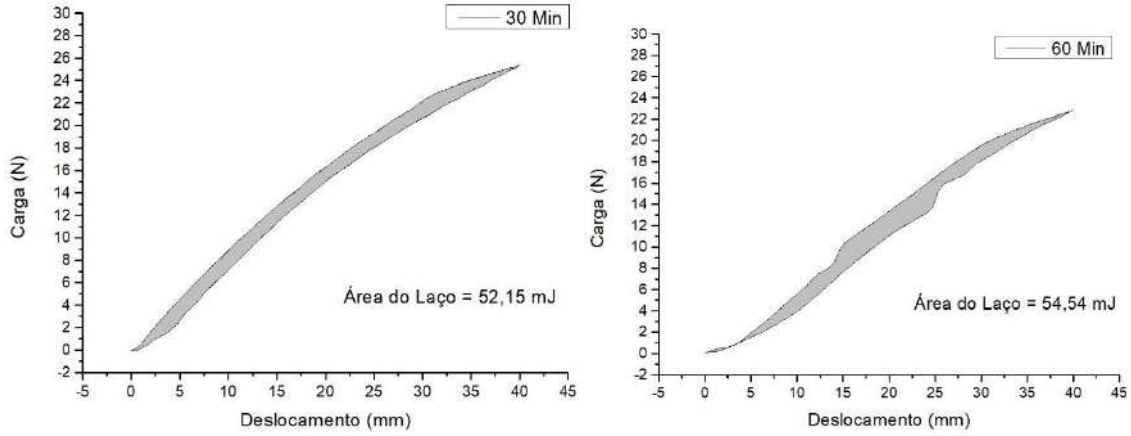
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



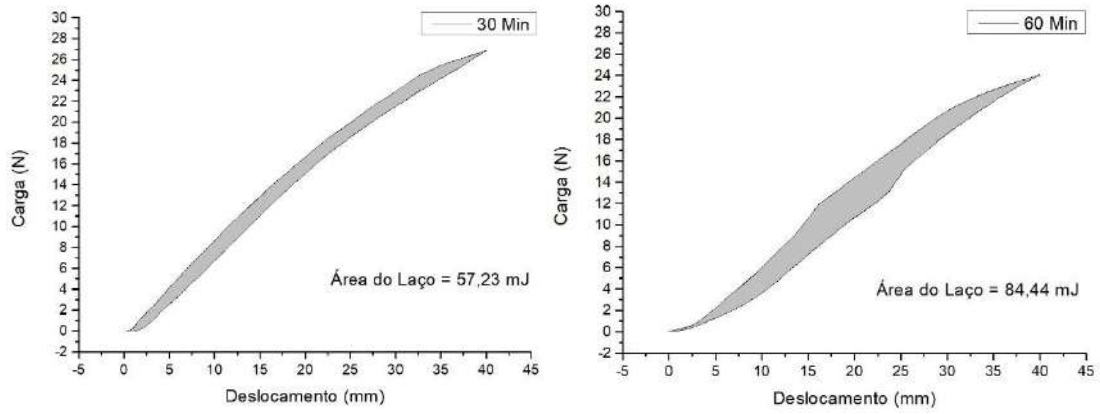
465ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



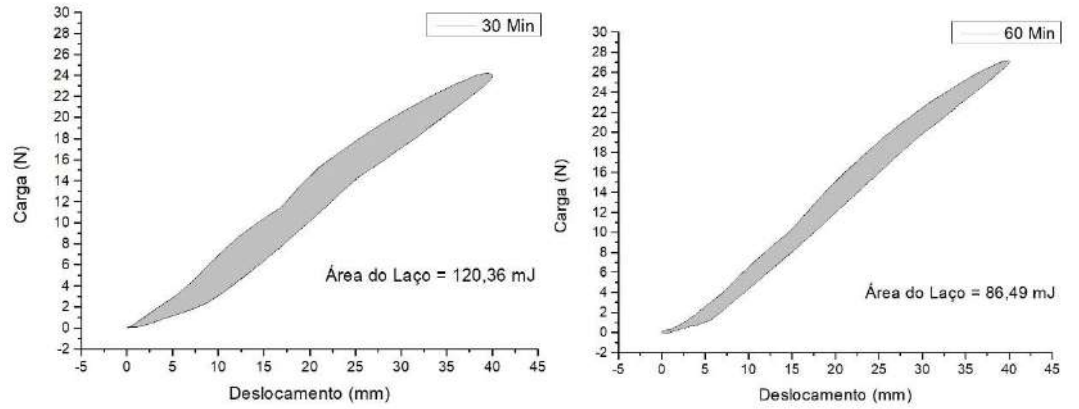
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



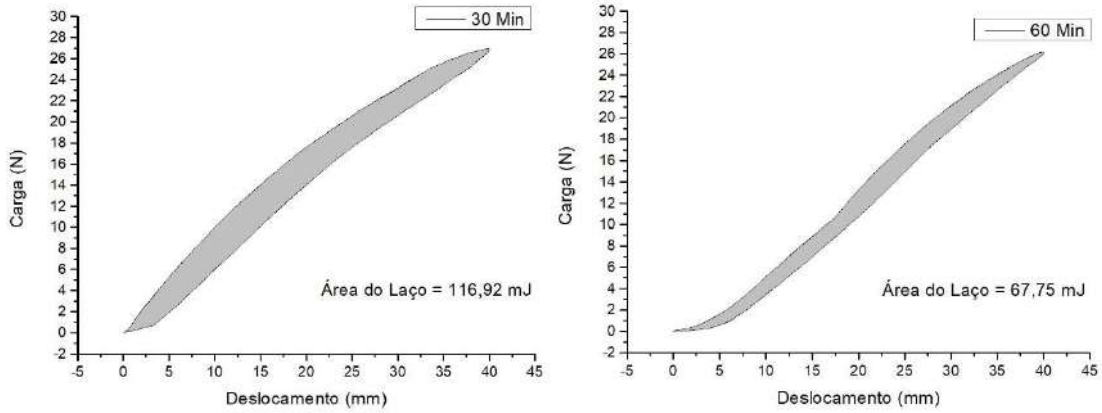
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



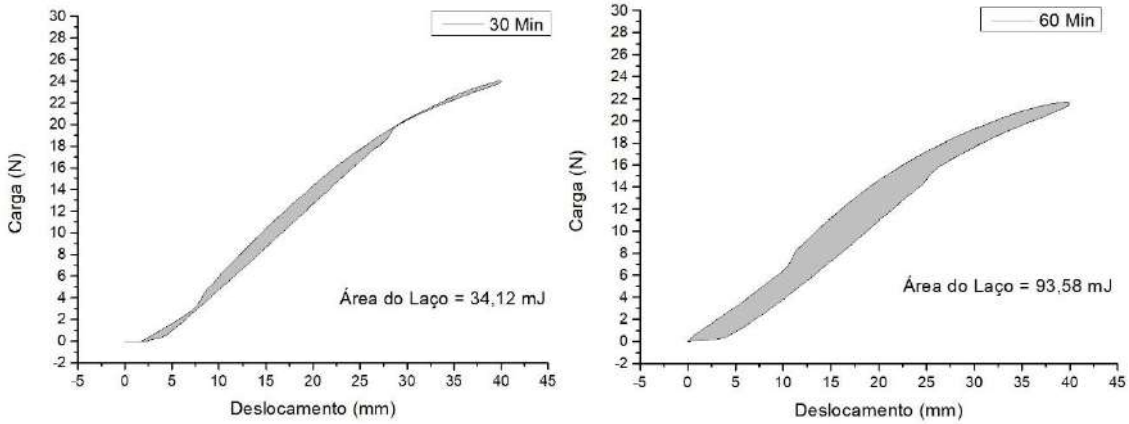
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.5 Hz – 2.5A



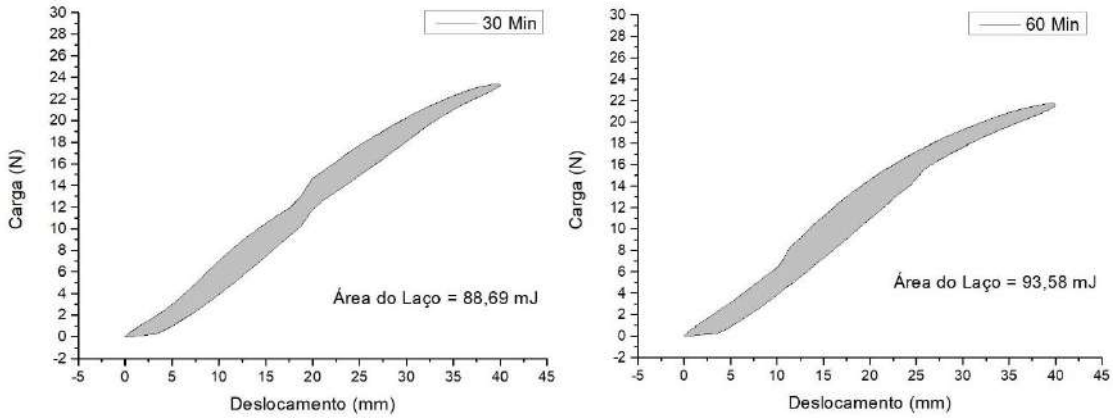
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



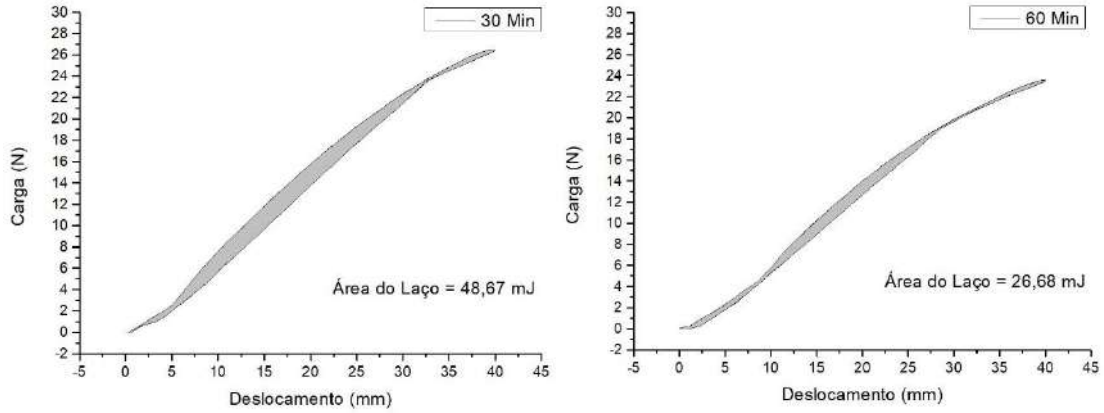
465ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



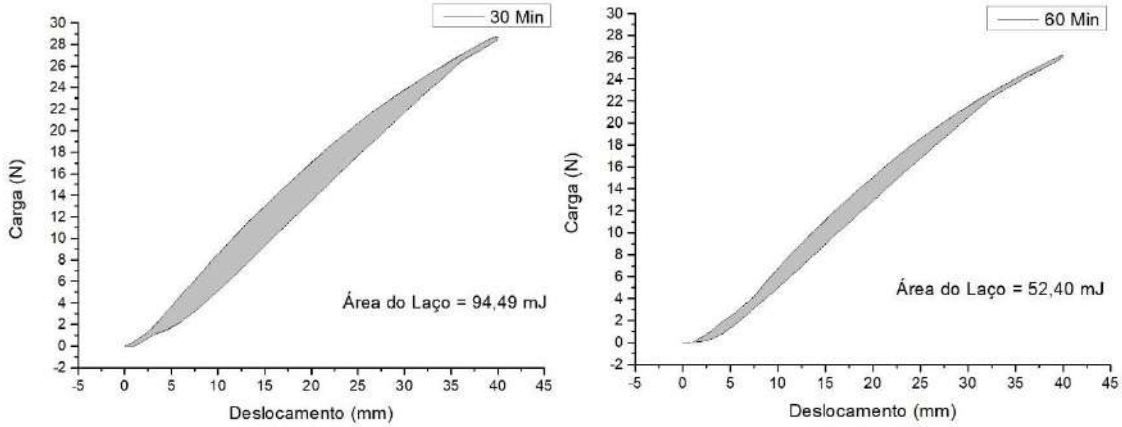
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



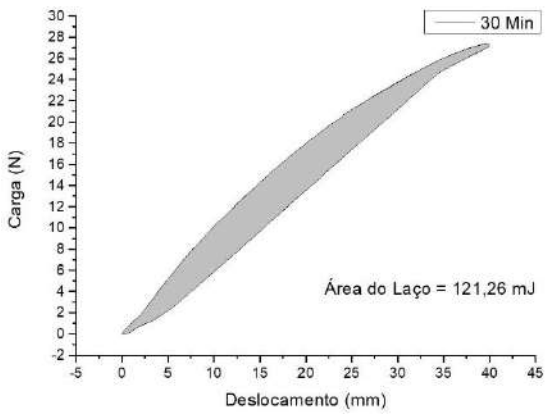
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 2.5A

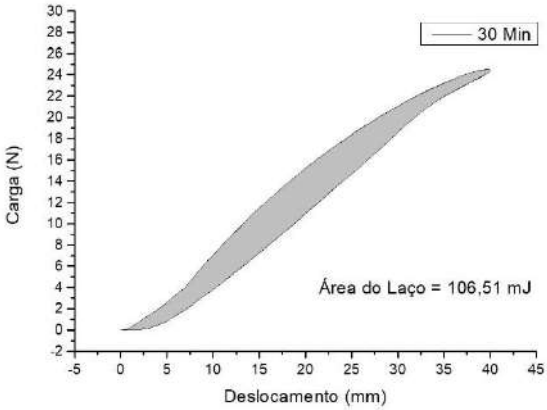


465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 2.5A

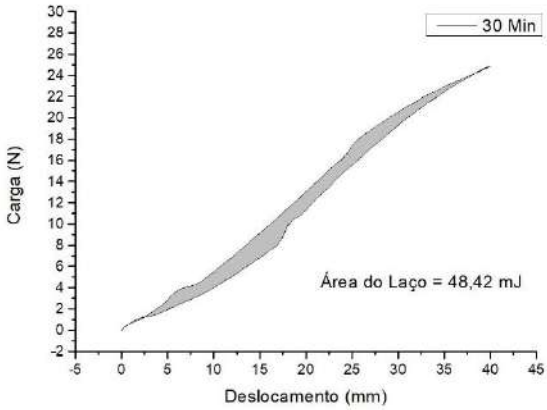


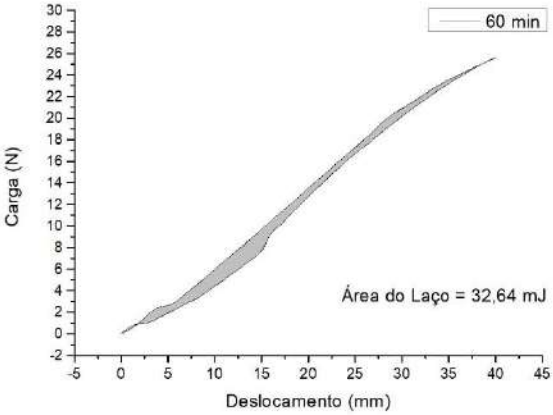
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



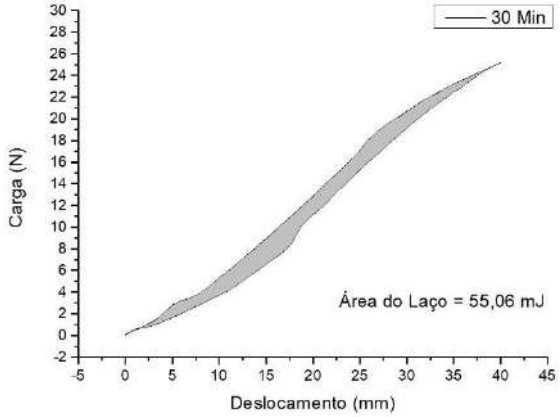


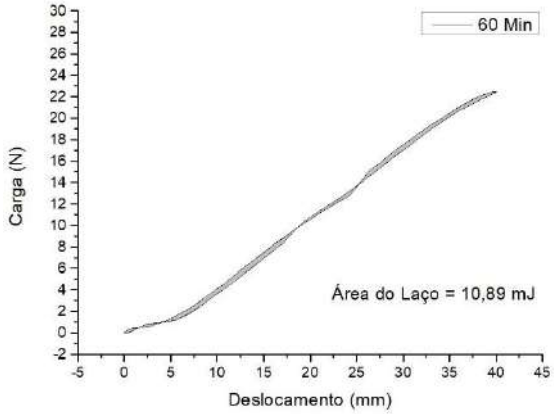
465ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



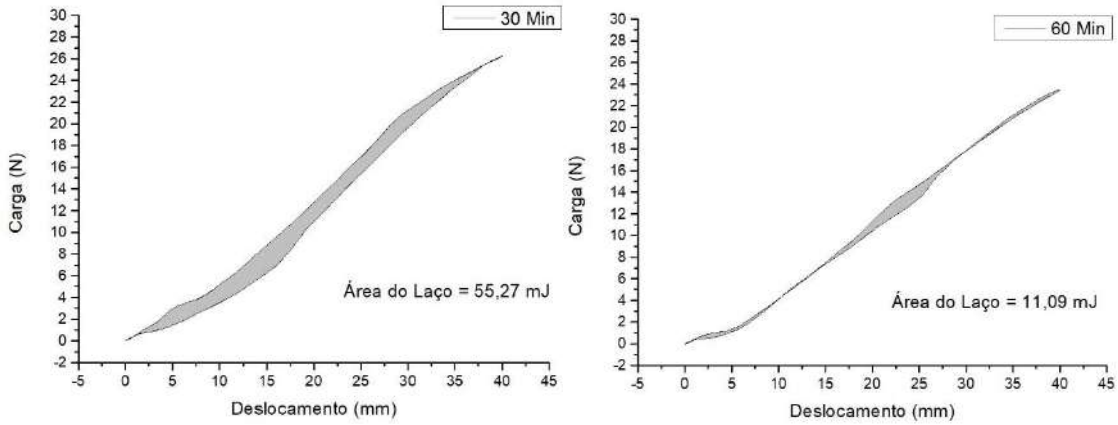


490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 2.5A

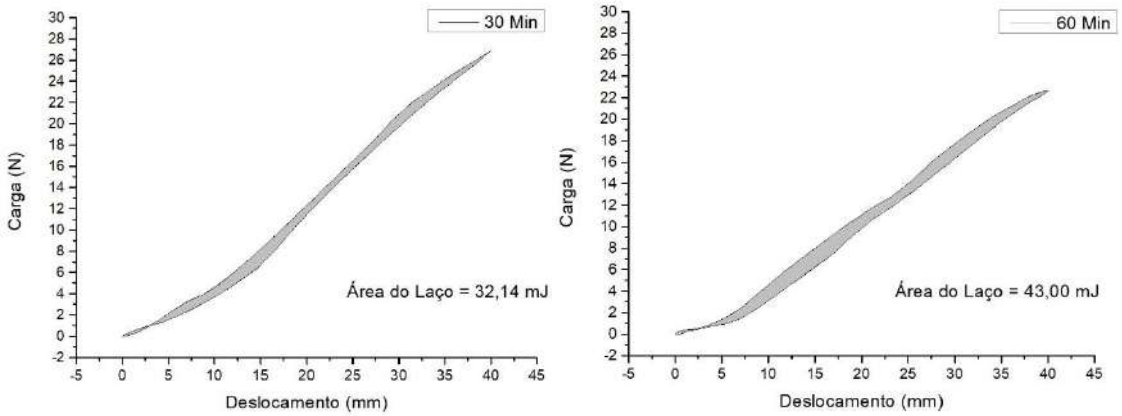




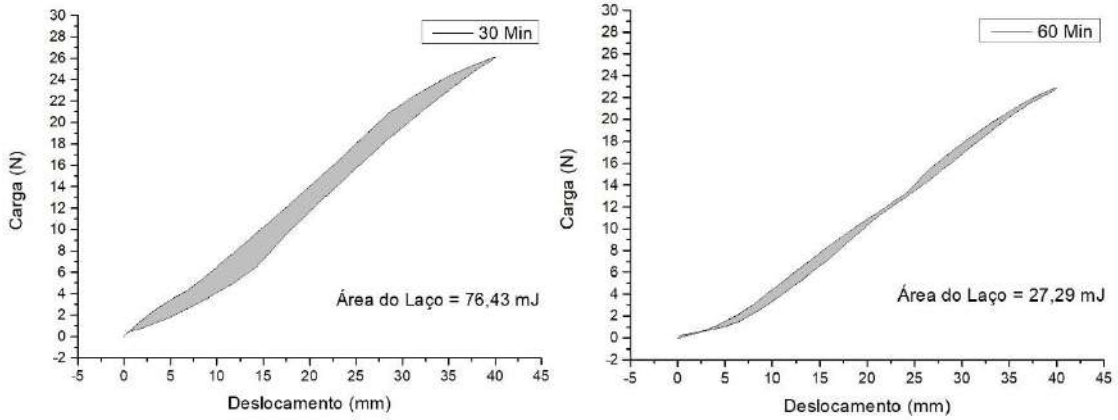
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



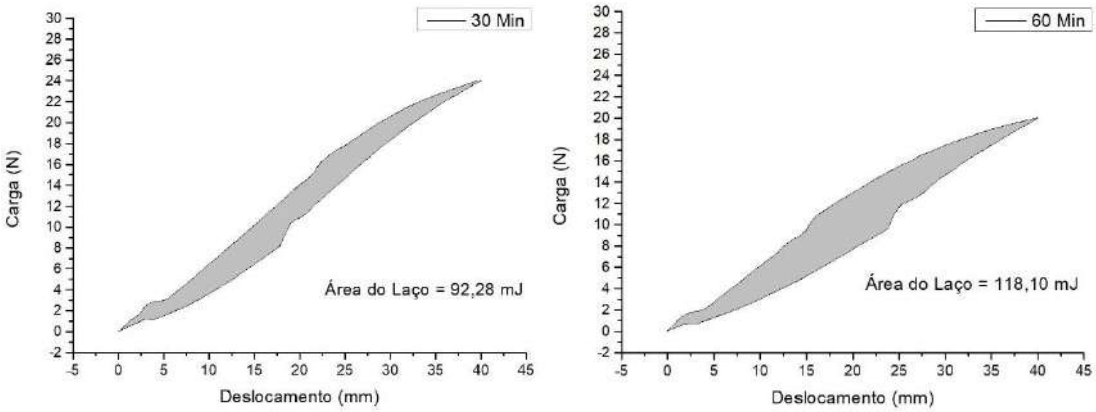
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 2.5A



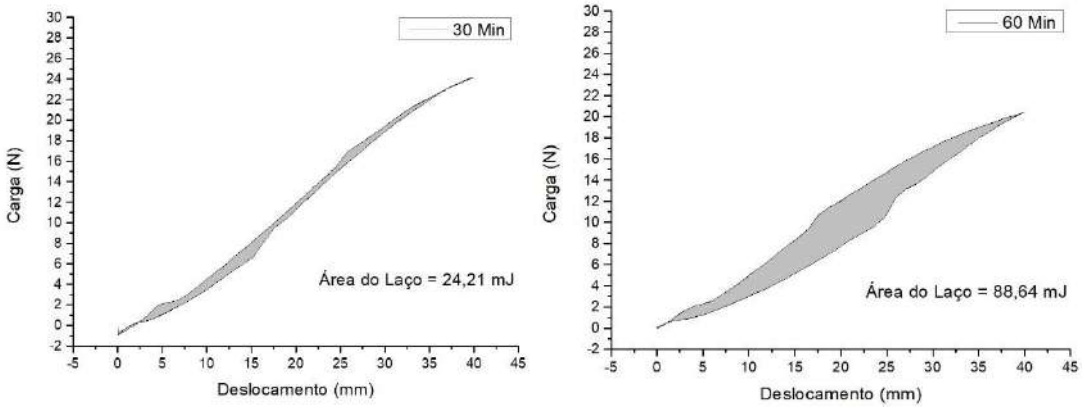
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



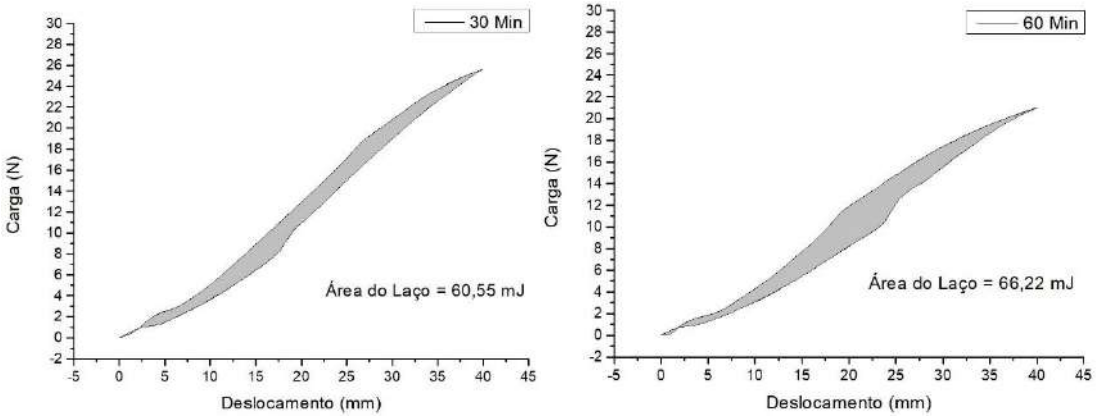
490ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



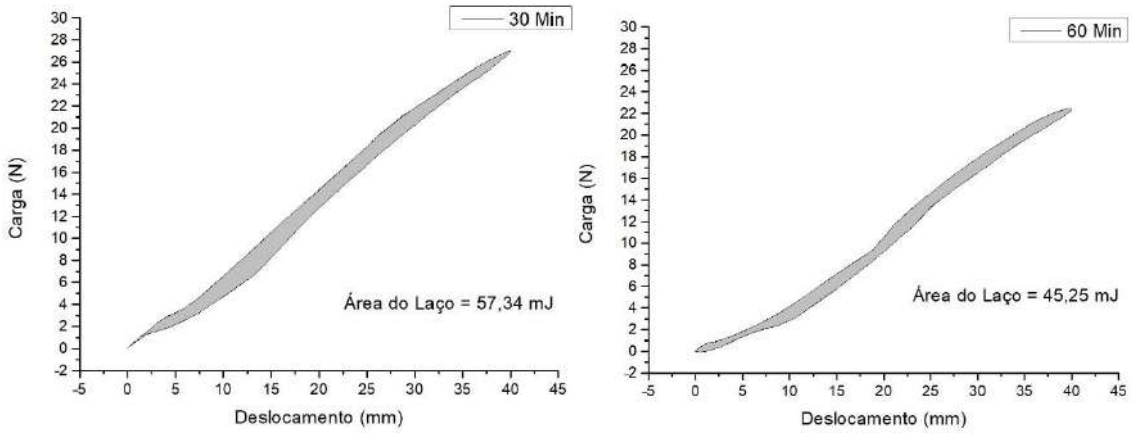
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



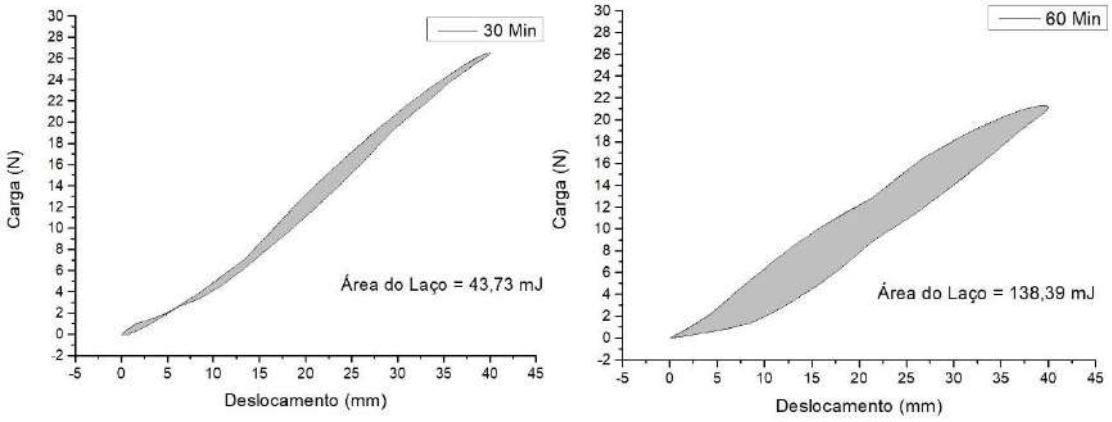
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



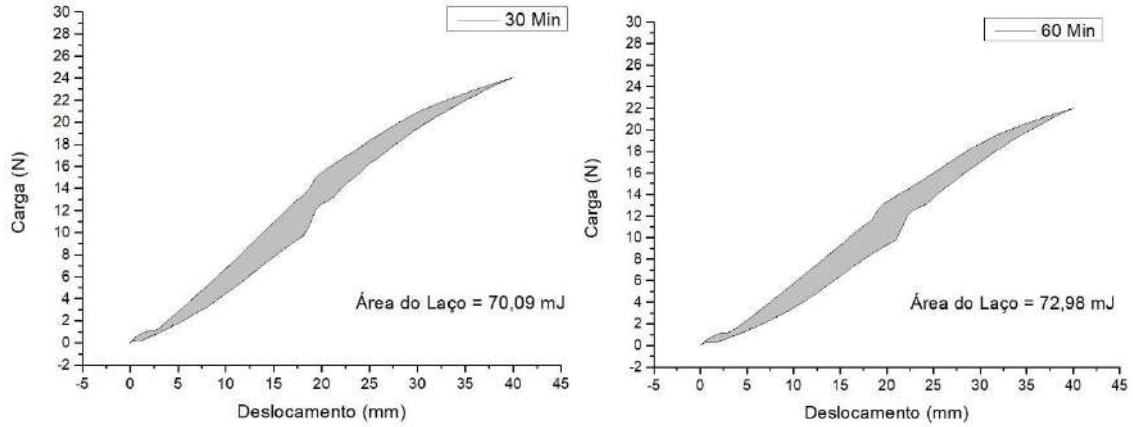
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.5 Hz – 2.5A



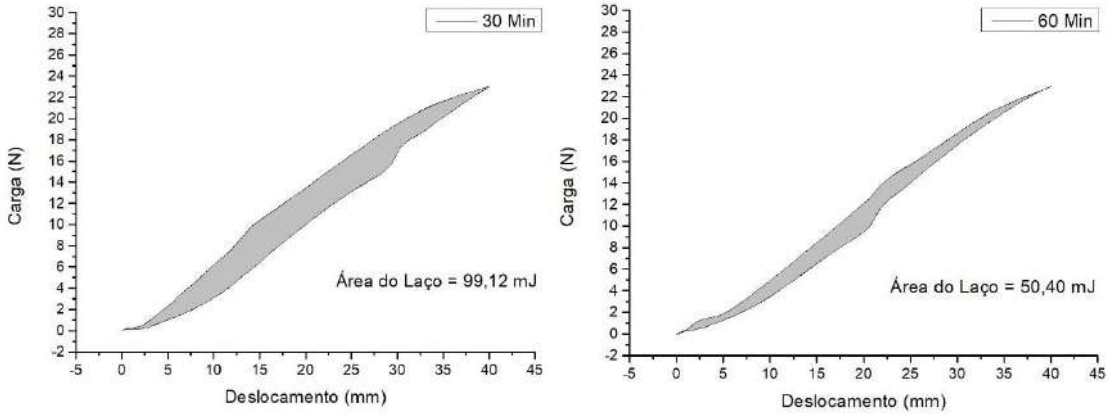
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



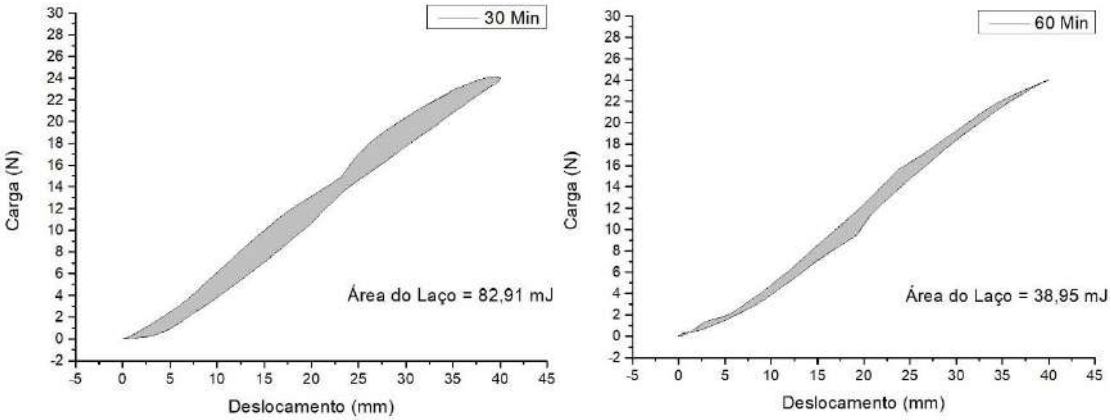
490ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



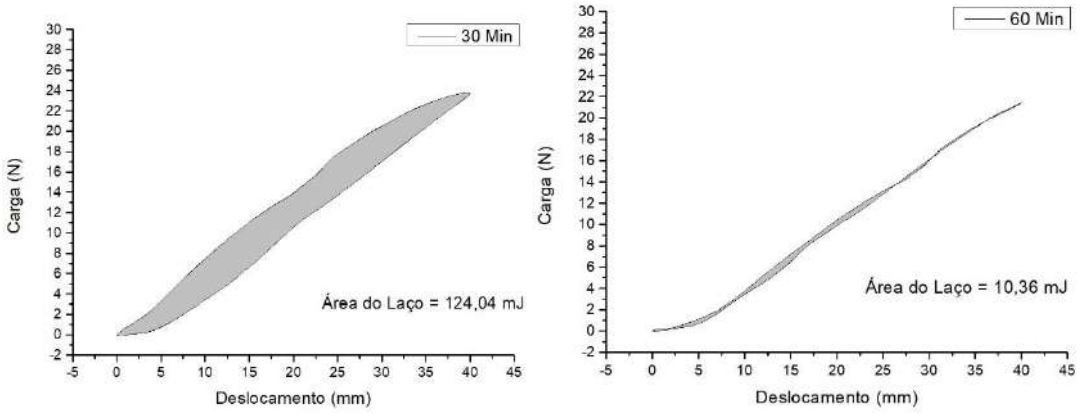
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



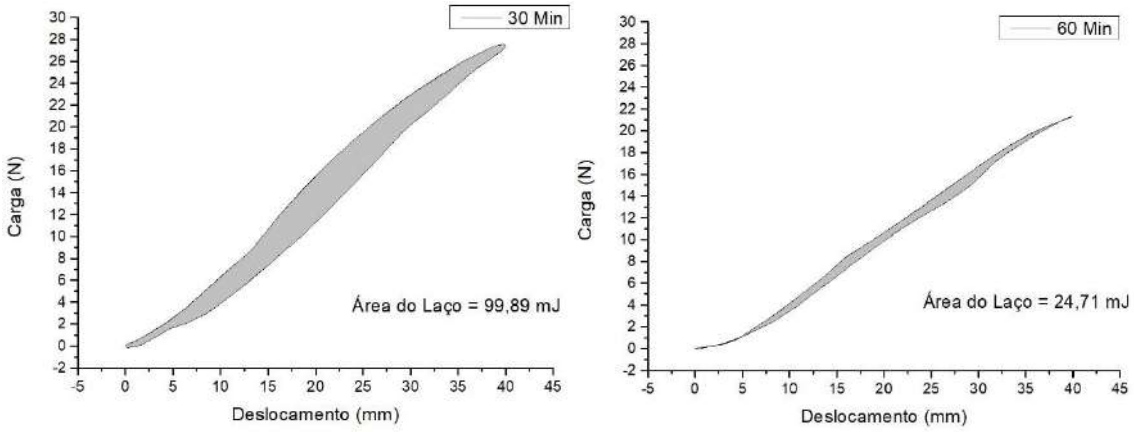
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



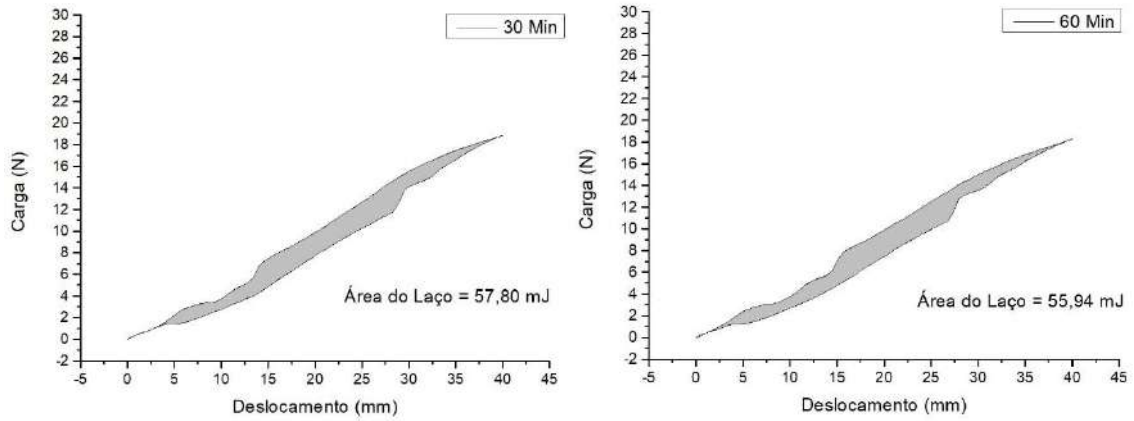
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 2.5A



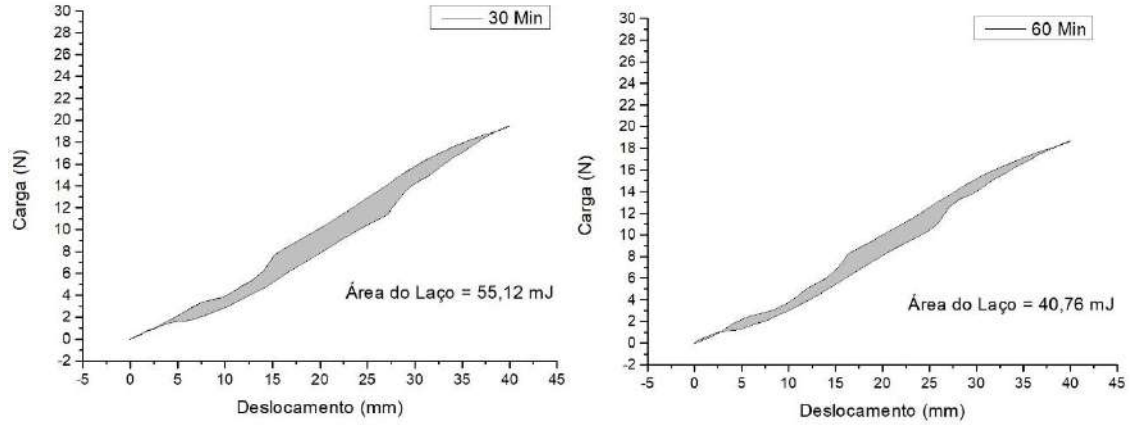
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



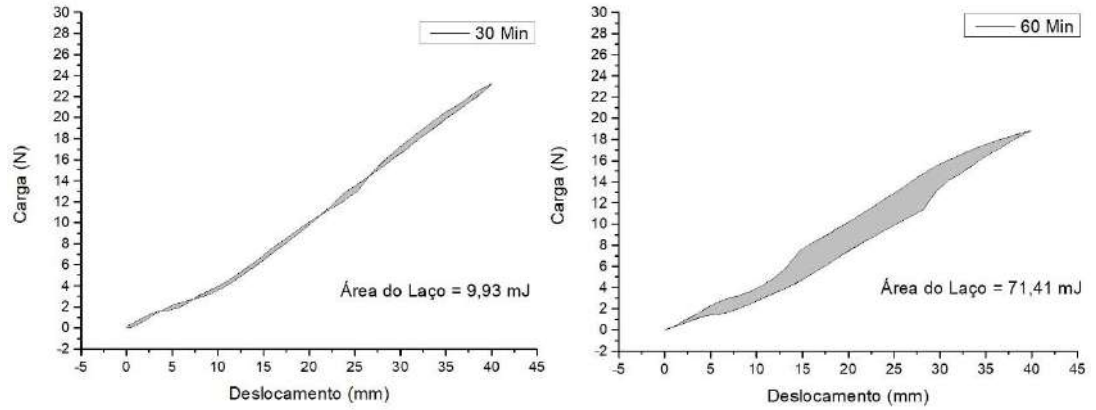
490ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



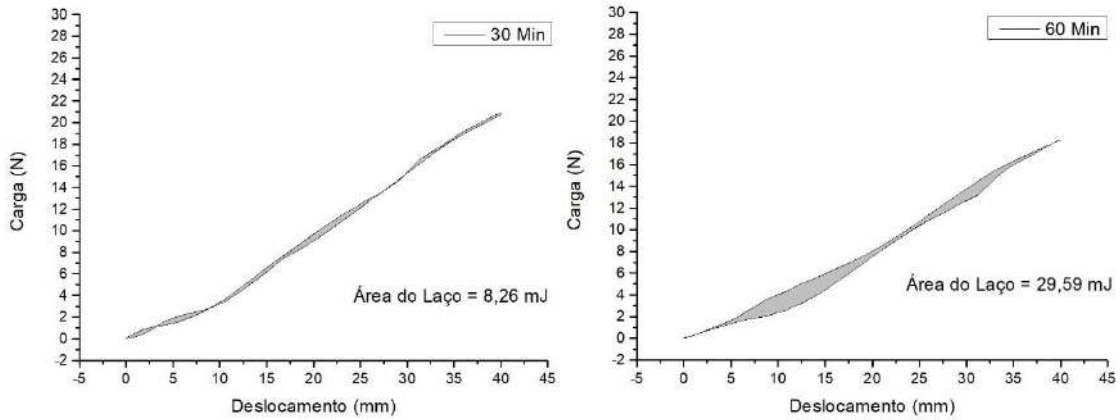
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



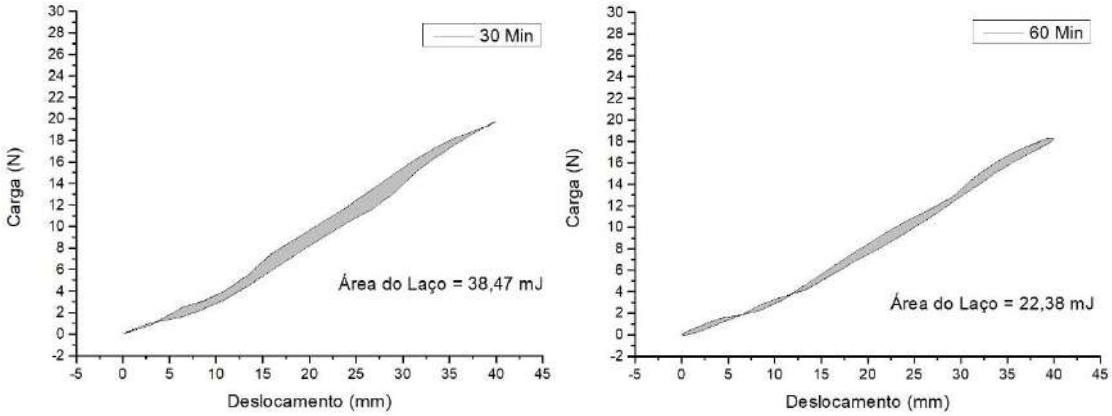
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



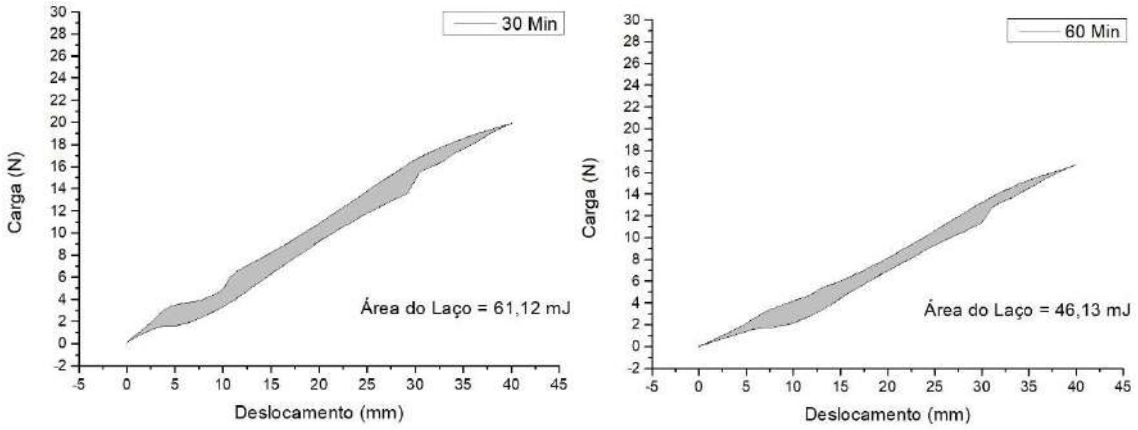
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 1.5 Hz – 2.5A



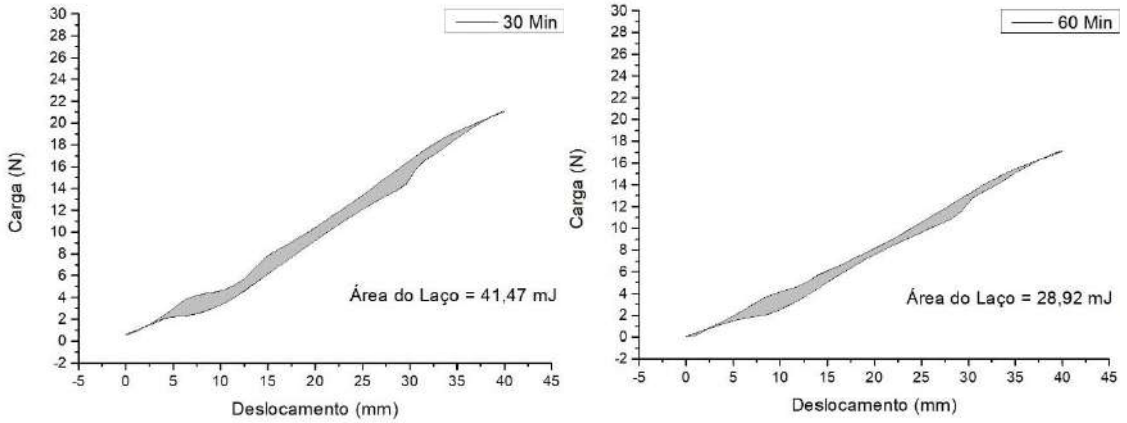
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



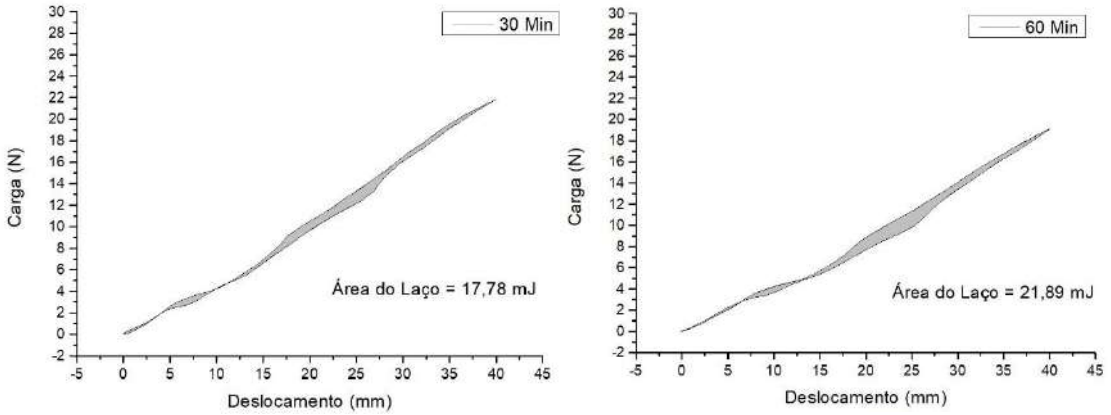
540ºC – Resfriamento em Água – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



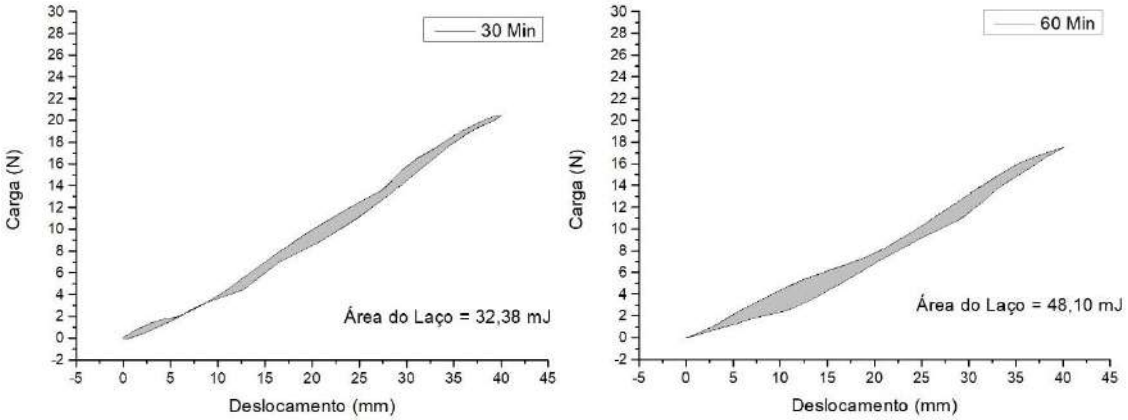
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



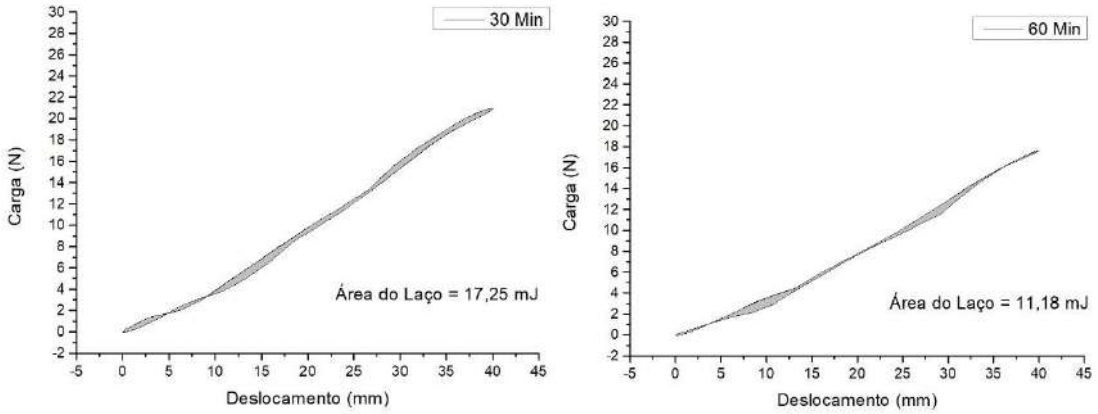
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



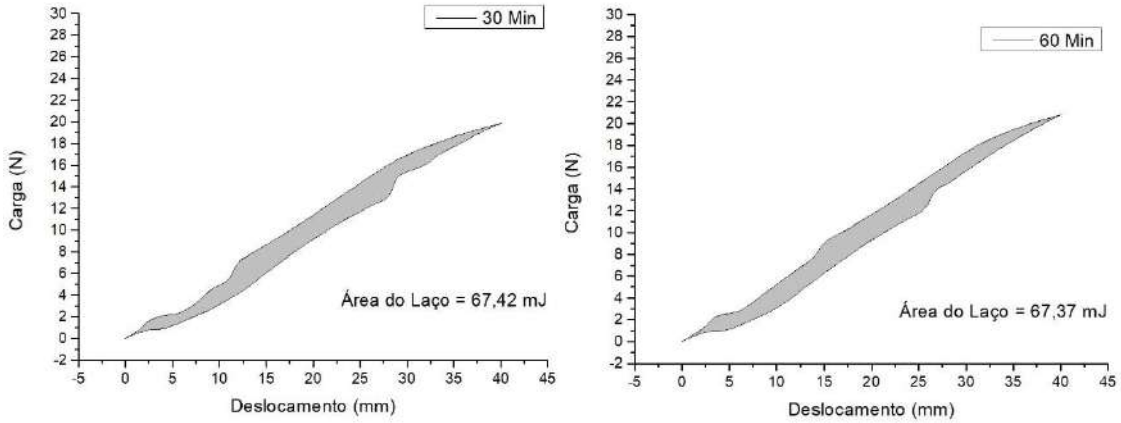
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 1.5 Hz – 2.5A



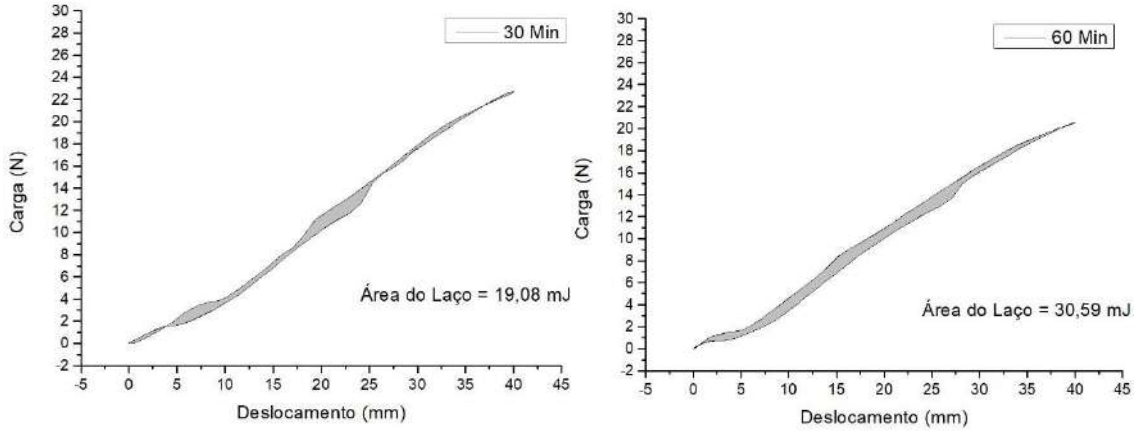
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.0 Hz – 2.5A



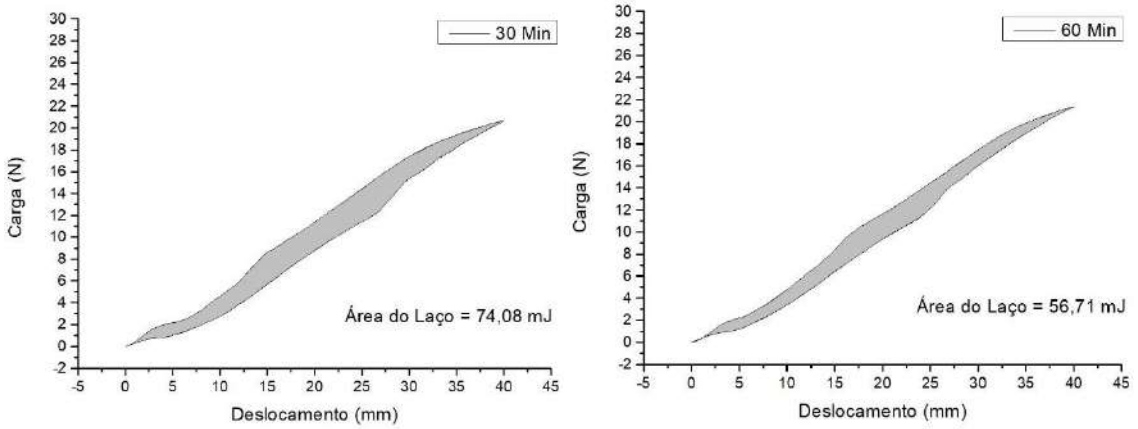
540ºC – Resfriamento ao Ar – Frequência 2.5 Hz – 2.5A



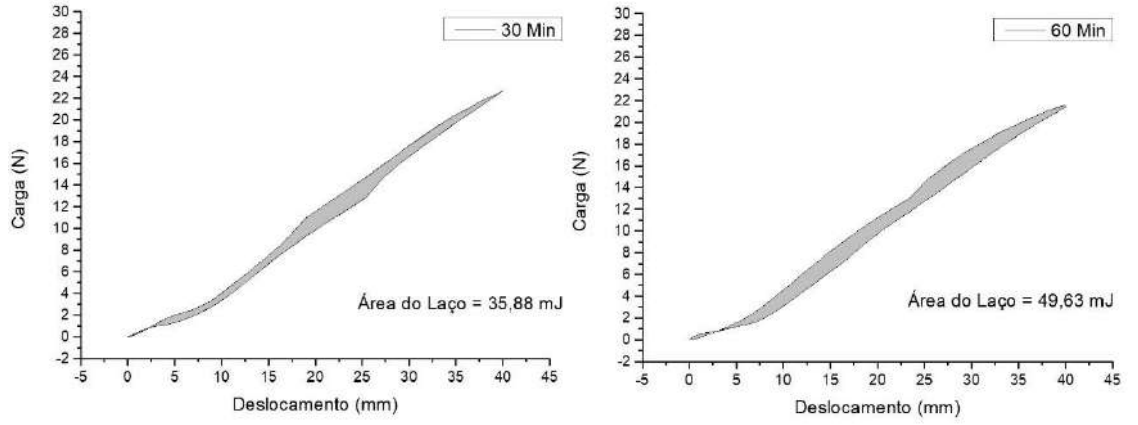
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 0.5 Hz – 2.5A



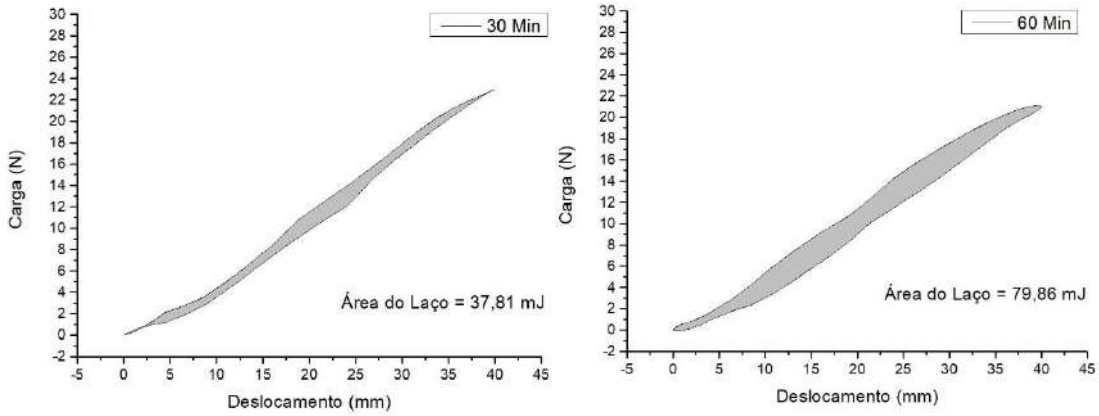
540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.0 Hz – 2.5A



540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 1.5 Hz – 2.5A

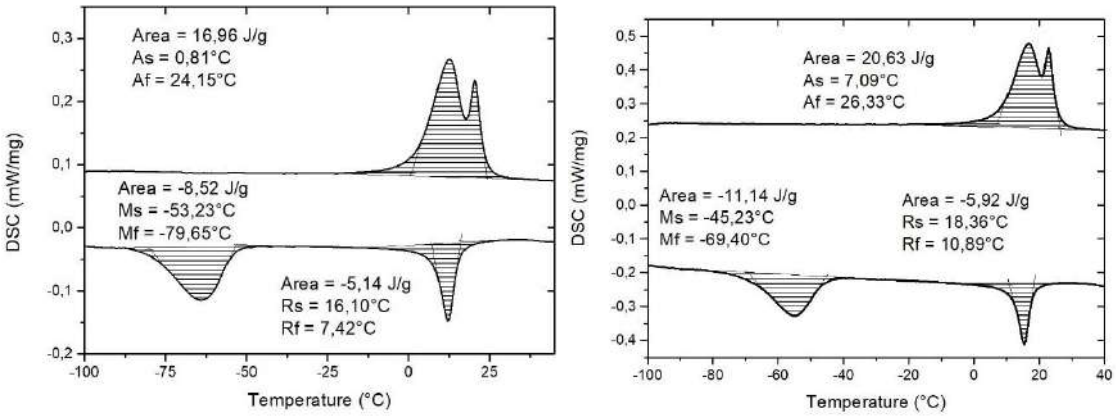


540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.0 Hz – 2.5A

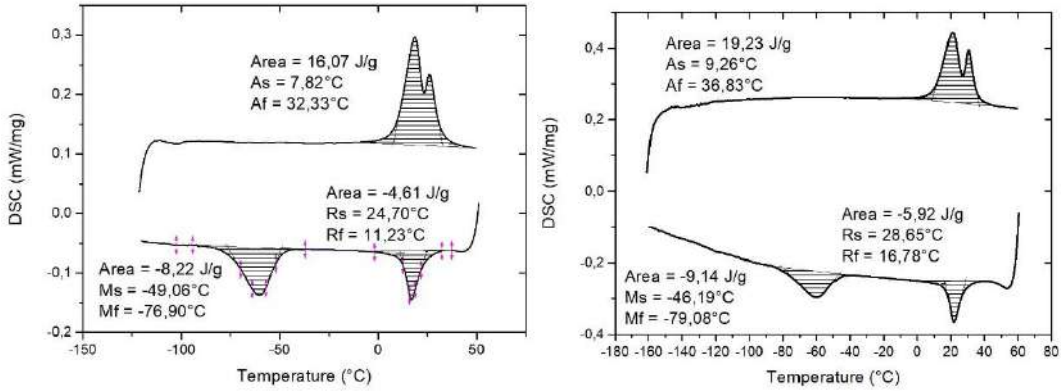


540ºC – Resfriamento no Forno – Frequência 2.5 Hz – 2.5ª

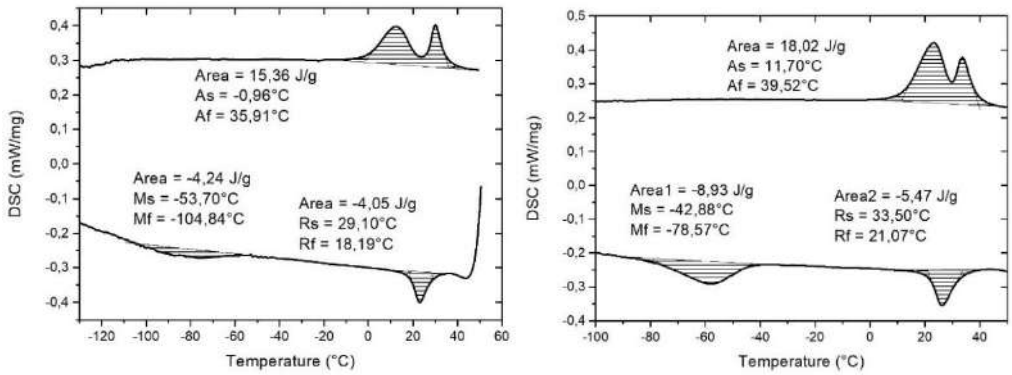
Anexo II



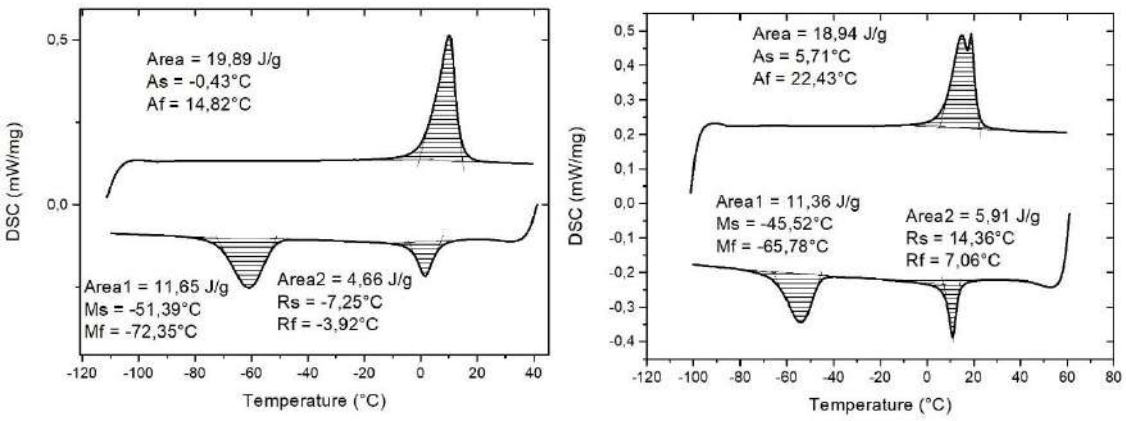
465ºC – Resfriamento em Água para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



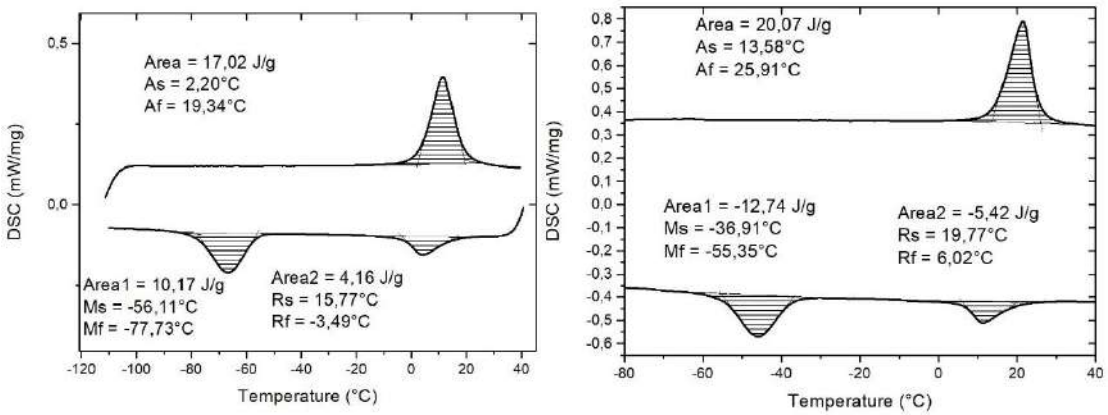
465ºC – Resfriamento ao Ar para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



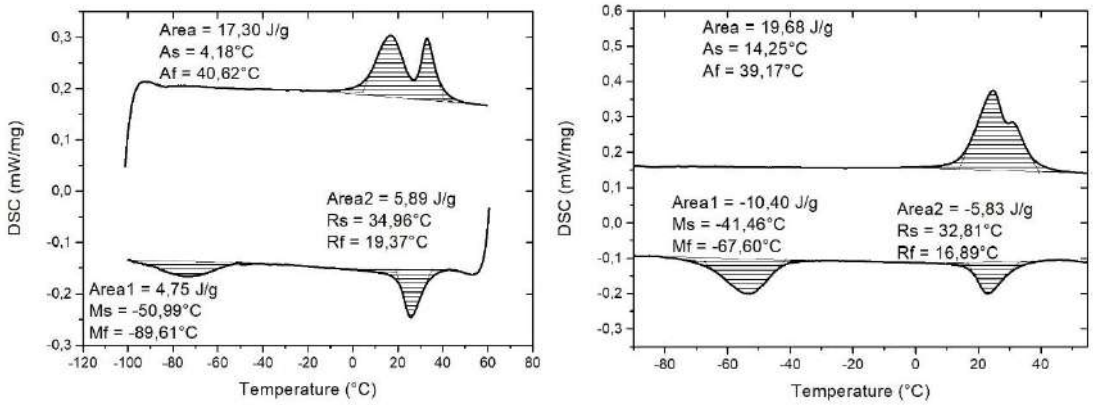
465ºC – Resfriamento no Forno para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



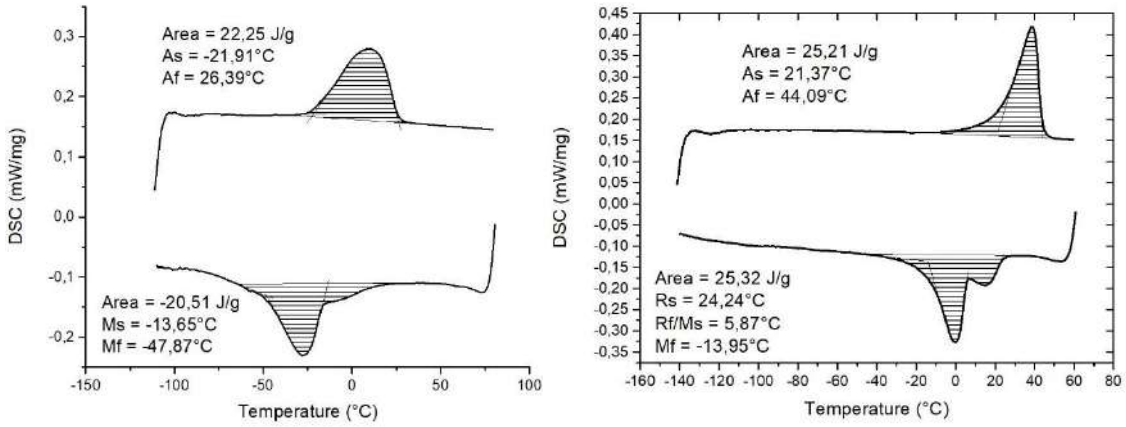
490ºC – Resfriamento em Água para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



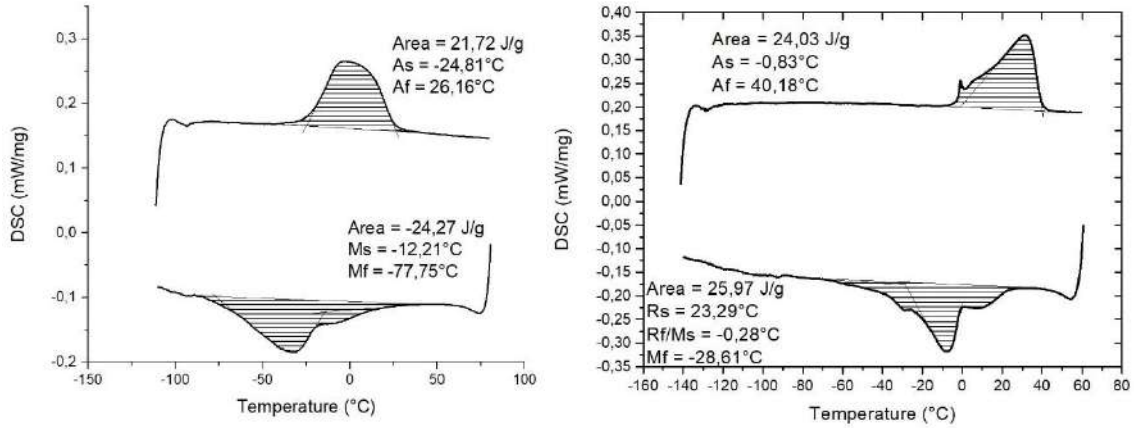
490ºC – Resfriamento ao Ar para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



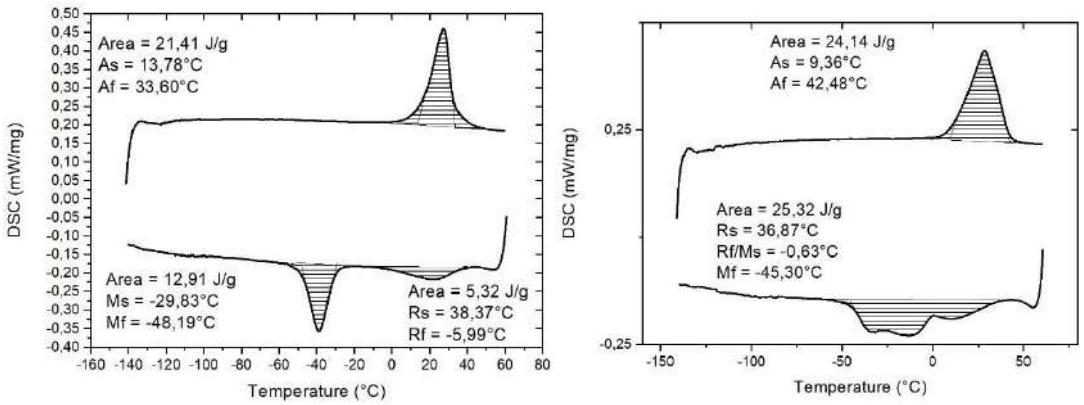
490ºC – Resfriamento no Forno para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



540ºC – Resfriamento em Água para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



540ºC – Resfriamento ao Ar para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.



540ºC – Resfriamento no Forno para as molas tratadas por 30 e 60 minutos respectivamente.