

---

*CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA*

---

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

FABIANA CLÁUDIA DE CARVALHO SOUZA FERNANDES

LUANDERSON CARLOS FERNANDES DA COSTA

NATHÁLIA DOS ANJOS COUTINHO PIMENTA

**ESTUDO DE DANO E RECUPERAÇÃO DE CHAPAS  
METÁLICAS COM MEMÓRIA DE FORMA PARA A UTILIZAÇÃO  
NA INDÚSTRIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RIO DE JANEIRO**

**2022**

**FABIANA CLÁUDIA DE CARVALHO SOUZA FERNANDES**

**LUANDERSON CARLOS FERNANDES DA COSTA**

**NATHÁLIA DOS ANJOS COUTINHO PIMENTA**

**ESTUDO NUMÉRICO DE DANO E RECUPERAÇÃO DE CHAPAS  
METÁLICAS COM MEMÓRIA DE FORMA PARA A UTILIZAÇÃO  
NA INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Orientador:  
Paulo Cesar da Câmara Monteiro  
Junior

**RIO DE JANEIRO**

**2022**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F363 Fernandes, Fabiana Cláudia de Carvalho Souza  
Estudo de dano e recuperação de chapas metálicas com  
memória de forma para a utilização na indústria / Fabiana Cláudia  
de Carvalho Souza Fernandes, Luanderson Carlos Fernandes da  
Costa [e] Nathália dos Anjos Coutinho Pimenta. — 2023.  
82f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.  
Bibliografia : f. 80-82  
Orientador: Paulo Cesar da Câmara Monteiro Junior

1. Engenharia mecânica. 2. Ligas com memória de forma. 3.  
Chapas de metal. 4. Indústria automobilística. I. Costa, Luanderson  
Carlos Fernandes da. II. Pimenta, Nathália dos Anjos Coutinho. III.  
Monteiro Junior, Paulo Cesar da Câmara. (Orient.). IV. Título.

CDD 621

## **AGRADECIMENTOS**

### **FABIANA CLÁUDIA DE CARVALHO SOUZA FERNANDES**

Começo dedicando meus agradecimentos a Deus que esteve ao meu lado conduzindo todos os meus passos e me dando força para enfrentar todos os desafios nessa jornada. Agradeço também aos meus pais Fábio e Tatiana, que sempre me deram todo suporte necessário para que eu pudesse correr atrás dos meus sonhos e que, por muitas vezes, optaram por mim ao invés deles mesmos e sempre estiveram ao meu lado me apoiando com muito amor.

Também demonstro toda minha gratidão ao meu noivo Marcus Vinícius com quem tenho o prazer de dividir a vida e que me incentiva todos os dias a me superar e cumprir todos os meus objetivos, sempre com muito amor, confiança e carinho.

Agradeço também aos meus irmãos Juninho e Fernanda, os melhores amigos que eu tive em toda a minha vida e que sempre me motivaram e acreditaram em mim.

Aos meus colegas de trabalho da ELFE e da CLADTEK, agradeço por todos os ensinamentos, toda paciência e todo suporte para que eu crescesse profissionalmente. Em especial, ressalvo minha gratidão ao meu primeiro chefe, Ranilson, que em todo tempo que me orientou sempre acreditou em mim e foi um exemplo de profissional e amigo.

Aos meus companheiros de curso do CEFET-RJ, deixo meus agradecimentos por terem compartilhado com muito carinho e determinação toda essa caminhada. Agradeço também aos meus amigos que me apoiaram e sempre estiveram ao meu lado, em especial ao Victor, Jullie, Karina e Samuel, que foram por várias vezes um porto seguro me encorajando em minha jornada.

Ademais, dedico minha gratidão ao professor Paulo Camara que orientou este estudo e que nos auxiliou nessa reta final, sempre disponível e disposto a extrair de nós o melhor e pelo apoio da FAPERJ, pois sem a mesma não seria possível desenvolver este trabalho. Agradeço aos meus queridos amigos Nathália e Luanderson pelo empenho e dedicação, tal como pelo comprometimento com nosso trabalho, mesmo em meio às dificuldades.

## **AGRADECIMENTOS**

### **LUANDERSON CARLOS FERNANDES DA COSTA**

Eu gostaria, primeiramente, de agradecer a Deus e a minha família, em principal meu pai Carlos e minha mãe Rosana, além das minhas irmãs Priscila e Thainá, no qual me deram suporte desde muito cedo, nunca deixando de me orientar as melhores decisões e de estarem ao meu lado, ao longo de toda a minha vida e sei que por muito tempo ainda.

O reconhecimento de gratidão vai às minhas amigas e companheiras na formulação deste projeto, Fabiana e Nathália, no qual estiveram ao meu lado desde cedo, reforçando um relacionamento de cooperação.

A minha amiga do estágio na MODEC, Mariana Gadelha, deixo aqui meus sinceros agradecimentos, pois você foi realmente importante no meu desenvolvimento profissional, deixando o ambiente de trabalho mais descontraído e fácil de lidar.

À equipe de turbomáquinas da MODEC, Reggiano Santos, Alexandre Badem, Claudio de Oliveira, Randolpho Santanna, Gabriel Pedreira e Carlos Vieira, deixo aqui todo o meu agradecimento por todas as lições, ensinamentos, tempos utilizados para me desenvolver e até correções. Vocês sempre se mostraram extremamente abertos a todas as minhas dúvidas e questionamentos, sempre se doando ao máximo para que eu alcançasse meu desenvolvimento profissional.

Ao professor Paulo Camara, deixo aqui meu mais que obrigado, por todo suporte prestado nesse projeto, foram dias e dias de reuniões a noite, além de dúvidas respondidas, inclusive aos finais de semana.

Aos meus amigos da vida, Tais e Aline, que estiveram comigo durante toda a minha vida, reforço tudo que já digo a vocês, todos foram de extrema importância na minha caminhada pelo CEFET/RJ, sempre ao meu lado quando eu mais precisava – e eu precisei bastante – nunca me deixando cair em desmotivação.

## AGRADECIMENTOS

### NATHÁLIA DOS ANJOS COUTINHO PIMENTA

Dou início aos meus agradecimentos a Deus por ter me amparado com força, dedicação e coragem para lidar com a trajetória acadêmica e profissional da Engenharia Mecânica. A todos os momentos em que me deparei com ansiedade e medo, busquei amparo, principalmente em Filipenses 4:6-9.

À minha família, agradeço a todos por todo apoio, conselhos e carinho. Sobretudo, aos meus pais, Sidney e Meire, que agradecerei sempre por serem minha base e por estarem e serem por mim em todos os momentos da minha vida.

Agradeço, também, aos meus colegas de trabalho da PROTEGO BRASIL, empresa que me acolheu e hoje, são como uma grande família, em especial o Departamento de Vendas Técnicas e Qualidade. Agradeço, também, aos meus amigos, que me ajudaram a tornar essa trajetória mais leve e extrovertida.

Ao professor orientador Paulo Camara, gratidão por toda disponibilidade, suporte e atenção ao nosso trabalho. O compromisso do orientador fez com que nós, orientados, nos esforçássemos para fazer o melhor para o nosso projeto, mesmo com todas as dificuldades. Agradeço também aos amigos Fabiana e Luanderson, na qual compartilho este trabalho, às mesmas atribuições.

Em nome do grupo, agradeço à FAPERJ, não só pela disponibilização dos corpos de prova para o estudo, mas também ao apoio e incentivo à ciência.

Ao meu falecido avô, Pedro Xavier, agradeço pelas palavras de motivação, sempre levei muito a sério quando dizia “*você é você, não é igual a ninguém*”. Hoje entendo o real significado dessa frase. A saudade estará eternamente em nossos corações.

Por fim, agradeço a mim por nunca ter desistido, mesmo diante de toda dificuldade, e pelo compromisso com as minhas responsabilidades. “*Quando seus desejos forem fortes o suficiente, parecerá que você possui poderes sobre-humanos para alcançá-los.*” - Napoleon Hill

## RESUMO

FERNANDES, Fabiana; FERNANDES, Luanderson; PIMENTA, Nathália.  
**ESTUDO NUMÉRICO DE DANO E RECUPERAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS COM MEMÓRIA DE FORMA PARA A UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica  
Celso Suckow da Fonseca.

Rio de Janeiro, 2023.

O presente trabalho aborda um estudo numérico e experimental da capacidade de recuperação de uma chapa metálica de Nitinol com efeito de memória de forma quando submetida a carregamentos pontuais. A avaliação de seu comportamento quando sujeito à danos teve como objetivo final a verificação de aplicação na funilaria de automóveis, mais especificamente no teto dos carros, devido a constante submissão desta região à impactos de objetos. As ligas com efeito de memória de forma possuem a capacidade termomecânica especial de recuperar seu formato original após um elevado percentual de deformação sofrida, devido as transformações de fase, alternando sua microestrutura entre as fases austenita e martensita. Foram realizados dois tipos de análises computacionais: ensaios dinâmicos com o lançamento vertical de esferas sobre a placa e, em sequência, ensaios estáticos, nas quais a deformação na chapa foi verificada pela formação de mocha. A partir da segunda modelagem, considerado mais adequado, foram realizados ensaios experimentais à título de comparação e validação dos dois cenários, e, por fim, verificou-se a aplicação na área automobilística. Este estudo, portanto, apresenta uma coleção de resultados numéricos e experimentais que podem ser complementados com outros parâmetros a fim de agregar na utilização de chapas de NiTi na indústria.

**Palavras-chave:** Ligas com memória de forma, chapas metálicas, Nitinol, Indústria automobilística

## ABSTRACT

FERNANDES, Fabiana; FERNANDES, Luanderson; PIMENTA, Nathália.  
**NUMERICAL STUDY OF DAMAGE AND RECOVERY OF METAL SHEET  
WITH SHAPE MEMORY FOR USE IN INDUSTRY.**

Course conclusion assignment – Centro Federal de Educação Tecnológica  
Celso Suckow da Fonseca.

Rio de Janeiro, 2023.

The present work deals with a numerical and experimental study of the recovery capacity of a Nitinol plate metal with shape memory effect when subjected to punctual loads. The final objective of evaluating its behavior when subject to damage was to verify its application in car bodywork, more specifically on the roof of cars, due to the constant submission of this region to the impact of objects. Alloys with shape memory effect have the special thermomechanical ability to recover their original shape after a high percentage of deformation suffered, due to phase transformations, alternating their microstructure between the austenite and martensite phases. Two types of computational analysis were carried out: dynamic tests with the vertical launching of spheres on the plate and, in sequence, static tests, in which the deformation in the plate was verified by the formation of a dent. From the second modeling, considered more appropriate, experimental tests were carried out in order to compare and validate the two scenarios, and, finally, the application in the automotive area was verified. This study, therefore, presents a collection of numerical and experimental results that can be complemented with other parameters in order to add to the use of NiTi plates in the industry.

**Keywords:** Shape memory alloys, metal plate, Nitinol, automotive industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo Simplificado da transformação martensítica.....	7
Figura 2 - Transformação de fase em função da temperatura .....	8
Figura 3 - Transformação de fase induzida por temperatura sem carregamento .....	10
Figura 4 - Transformação de fase induzida por temperatura sem carregamento mecânico.....	11
Figura 5 - Transformação de fase induzida por temperatura com carregamento mecânico.....	12
Figura 6 - Transformação de fase austenita para martensita maclada e demaclada por ação de temperatura com carregamento.....	13
Figura 7 - Ciclo de Efeito de Memória de Forma Unidirecional .....	14
Figura 8 - Ciclo de carregamento elástico em ligas com EMF .....	16
Figura 9 - Acoplador de tubos de NiTi.....	18
Figura 10 - Utilização de fios ortodônticos de NiTi .....	19
Figura 11 - Representação de um stent de NiTi.....	20
Figura 12 - Simulação de tendões robóticos acionados por NiTi .....	21
Figura 13 - Aplicação do Nitinol no corpo humano.....	22
Figura 14 - Potencial aplicação do Nitinol em automóveis .....	24
Figura 15 - Faixas de temperatura para aplicação em ligas de NiTi .....	25
Figura 16 - Curva deformação x temperatura para dois ciclos térmicos com tensões.....	31
Figura 17 - Placa de Nitinol utilizada para análise na ferramenta ANSYS .....	33
Figura 18 - Representação gráfica do contato da esfera com a chapa, gerando a deformação .....	34
Figura 19 - Geometria elemento SOLID186.....	36
Figura 20 - Gráfico Tensão x Etapa .....	37
Figura 21 - Gráfico tamanho do elemento x Tempo de processamento.....	38
Figura 22 - Malha da geometria .....	39
Figura 23 - Comparação gráfico numérico x experimental da curva tensão x deformação do fio de Nitinol.....	40

Figura 24 - Tensão Máxima em MPa absorvida pela placa de Nitinol para cada altura de queda livre da esfera de 10 mm .....	42
Figura 25 - Tensão Máxima em MPa absorvida pela placa de Nitinol para cada altura de queda livre da esfera de 20 mm .....	42
Figura 26 - Diagrama tensão-deformação para cada altura de queda referente à esfera de 20 mm de diâmetro.....	45
Figura 27 - Ferramenta indentadora.....	46
Figura 28 - Ciclo de carregamento e descarregamento, relacionando tensão e deformação. ....	48
Figura 29 - Curva de elasticidade.....	48
Figura 30 - Tensão de escoamento e o módulo elástico da liga .....	49
Figura 31 - Etapas da simulação de deformação por moessa .....	51
Figura 32 - Representação gráfica do teste por moessa.....	51
Figura 33 - Representação das zonas críticas da placa de acordo com o contato com a ferramenta para os deslocamentos máximos. ....	52
Figura 34 - Representação das deformações plásticas residuais da placa de acordo com o contato com a ferramenta para os deslocamentos máximos.....	53
Figura 35 - Representação da evolução da carga aplicada à ferramenta com o tempo para cada deslocamento máximo.....	54
Figura 36 - Carregamento máximo por deslocamento .....	55
Figura 37 - Estado final da chapa após tratamento térmico para cada deslocamento máximo .....	56
Figura 38 - Representação do comportamento do deslocamento em relação ao tempo para cada deslocamento máximo.....	58
Figura 39 - Tensão aplicada à placa e deslocamento resultante para cada deslocamento máximo .....	59
Figura 40 - Proporção de martensita em relação ao tempo para cada deslocamento máximo .....	60
Figura 41 - Proporção de austenita em relação ao tempo para cada deslocamento máximo .....	60
Figura 42 - Representação do comportamento da placa quanto à temperatura, deslocamento e carregamento para cada simulação .....	62

Figura 43 - Comparação dos resultados numéricos para cada simulação relacionando força e deslocamento.....	62
Figura 44 - Comparação dos resultados numéricos para cada simulação relacionando deslocamento e tempo.....	63
Figura 45 - Comparação das proporções de austenita e martensita para cada simulação em relação ao tempo.....	64
Figura 46 - Deformação sofrida pela placa após o primeiro ensaio experimental .....	66
Figura 47 – Plasticidade pontual na chapa provocada no primeiro ensaio .....	67
Figura 48 - Deformação e recuperação da chapa no segundo ensaio .....	68
Figura 49 - Deformação e recuperação da chapa no terceiro ensaio.....	69
Figura 50 - Deformação e recuperação da chapa no quarto ensaio .....	69
Figura 51 - Deformação e recuperação da chapa no quinto ensaio.....	70
Figura 52 - Representação gráfica da placa Nitinol analisada .....	71
Figura 53 - Ciclo de carregamento e descarregamento exercido sobre a placa .....	71
Figura 54 - Comparação dos resultados obtidos no experimento e na simulação relacionando tensão e deformação .....	72
Figura 55 - Comparação dos resultados obtidos no experimento e na simulação relacionando carga e extensão máxima de 4,45 mm .....	73
Figura 56 - Comparação dos resultados obtidos no experimento e na simulação relacionando carga e extensão máxima de 3,34 mm .....	73
Figura 57 - Deformação em automóvel causada por chuva de granizo .....	76
Figura 58 - Aplicação exemplificada de chapas de Nitinol no teto de automóveis .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre atuadores DC e de NiTi .....	23
Tabela 2 - Parâmetros do Modelo do ANSYS .....	31
Tabela 3 - Parâmetros de simulação ANSYS.....	35
Tabela 4 - Propriedades Elásticas da Austenita.....	36
Tabela 5 - Resultados a partir do tamanho de malha.....	38
Tabela 6 - Relação altura de queda e velocidade de impacto.....	41
Tabela 7 - Deslocamento residual relacionado a cada deslocamento máximo	55
Tabela 8 - Temperatura na qual há o alívio total das deformações residuais para cada deslocamento máximo.....	57
Tabela 9 - Proporção martensítica para cada deslocamento máximo.....	61

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\nu$	Coeficiente de Poisson;
$\infty$	Infinito;
$\partial$	Diferenciação;
$\tau_{\varepsilon_L}$	Função indicatriz;
$\sigma_f$	Tensão final;
$\sigma_s$	Tensão inicial;
$\sigma^{Af}$	Tensão que determina o fim da transformação reversa;
$\sigma^{As}$	Tensão que determina o início da transformação reversa;
$\sigma^{Mf}$	Tensão que determina o fim da transformação martensítica;
$\sigma^{Ms}$	Tensão que determina o início da transformação martensítica;
$\sigma_i^{AM}$	Tensão crítica de transformação inicial de austenita para martensita;
$\sigma_f^{AM}$	Tensão crítica de transformação final de austenita para martensita;
$\sigma_i^{MA}$	Tensão crítica de transformação inicial de martensita para austenita;
$\sigma_f^{MA}$	Tensão crítica de transformação final de martensita para austenita;
$\varepsilon$	Deformação;
$\varepsilon_L$	Máxima deformação de transformação;
$\epsilon$	Partes desviadoras do tensor de deformação $\varepsilon$ ;
$\epsilon^{tr}$	Deformação associada à transformação de fase.
$\beta$	Parâmetro de escala de temperatura;
$\beta$	Dependência entre a tensão crítica e a temperatura;
$\theta$	Partes volumétricas do tensor de deformação $\varepsilon$ ;
$\Psi$	Densidade de energia livre;
$\zeta$	Evolução da fração volumétrica da fase martensítica;
A	Austenita;
$A_f^\sigma$	Temperatura na qual finaliza-se a transformação reversa de martensita para austenita para a carga aplicada;

$A_S^\sigma$	Temperatura na qual inicia-se a transformação reversa de martensita para austenita para a carga aplicada;
$A_F$	Temperatura na qual finaliza-se a transformação reversa de martensita para austenita;
$A_S$	Temperatura na qual inicia-se a transformação reversa de martensita para austenita;
E	Módulo de Young;
$E_m$	Módulo de elasticidade da martensita;
F	Função da evolução da transformação de fase e do comportamento inelástico;
G	Módulo de cisalhamento;
h	Parâmetro de endurecimento;
K	Módulo de compressibilidade;
m	Parâmetro de dependência de Lode;
M	Martensita;
$M_f^\sigma$	Temperatura na qual finaliza-se o processo de transformação da austenita em martensita para a carga aplicada;
$M_S^\sigma$	Temperatura na qual inicia-se o processo de transformação da austenita em martensita para a carga aplicada;
$M^D$	Martensita demaçada;
$M_f$	Temperatura na qual finaliza-se o processo de transformação da austenita em martensita;
$M_S$	Temperatura na qual inicia-se o processo de transformação da austenita em martensita;
$M^t$	Martensita maçada;
p	Partes volumétricas da tensão $\sigma$ ;
s	Partes desviadoras da tensão $\sigma$ ;
R	Limite elástico da chapa de Nitinol;
s	Segundos;
T	Temperatura;
$T_0$	Temperatura de referência da liga Nitinol;

$T^*$  Temperatura de referência abaixo da qual somente a fase martensítica é estável;

$X$  Força termodinâmica associada à transformação de fase.

## LISTA DE SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio;
DSC	Digital Scanning Calorimetry;
EMF	Efeito Memória de Forma;
EUA	Estados Unidos da América;
G1	Portal de Notícias da Rede Globo;
GM	General Motors;
LMF	Ligas com Memória de Forma;
SE	Superelasticidade;
SMA	Shape Memory Alloy;
SME	Shape Memory Effect.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
	1.1 OBJETIVO.....	2
	1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
	1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL .....	3
<b>2</b>	<b>EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA .....</b>	<b>5</b>
	2.1 TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS NAS LIGAS DE NITI ...	6
	2.1.1 Influência da Temperatura.....	8
	2.1.2 Influência de Carregamentos Mecânicos .....	10
	2.2 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA .....	12
	2.3 SUPERELASTICIDADE.....	15
<b>3</b>	<b>APLICAÇÕES.....</b>	<b>17</b>
	3.1 APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL.....	17
	3.2 APLICAÇÕES NA ODONTOLOGIA .....	19
	3.3 APLICAÇÕES NA MEDICINA .....	19
	3.4 APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA .....	22
	3.5 DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÕES .....	24
<b>4</b>	<b>MODELO CONSTITUTIVO .....</b>	<b>27</b>
	4.1 MODELO CONSTITUTIVO PARA MODELAGEM DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA .....	27
	4.1.1 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO .....	30
<b>5</b>	<b>METODOLOGIAS DE ESTUDO .....</b>	<b>33</b>

5.1	METODOLOGIA DINÂMICA: DEFORMAÇÃO POR LANÇAMENTO DE ESFERAS .....	34
5.1.1	Calibração do Modelo Numérico .....	35
5.1.2	Convergência de Malha.....	37
5.1.3	Validação Numérica.....	39
5.1.4	Testes de Queda .....	40
5.1.5	Análise dos Resultados .....	43
5.2	METODOLOGIA ESTÁTICA: DEFORMAÇÃO POR MOSSA .....	46
5.2.1	Calibração do Modelo Experimental .....	47
5.2.2	Testes Numéricos de Carga e Deslocamento .....	50
5.2.2.1	Validação numérica .....	51
5.2.2.2	Análise dos resultados numéricos.....	64
5.2.3	Testes Experimentais de Carga e Deslocamento .....	65
5.2.3.1	Validação experimental .....	65
5.2.4	Comparação numérica-experimental .....	70
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
6.1	A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA COMO UM SETOR PROMISSOR .....	75
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais metálicos, estão presentes em praticamente todos os setores da economia, desde as indústrias de base até a produção de bens de consumo. Sua vasta aplicação advém, sobretudo, da revolução industrial que foi de extrema importância para o avanço dos estudos da metalurgia.

Devido a tal fato histórico, indústrias como a aeronáutica, automobilística e a militar desenvolveram-se de tal forma que, atualmente, utilizam materiais que permitem aplicações específicas, como por exemplo o uso de ligas de alumínio na estrutura de carros e aviões que promovem a redução de custo de fabricação, auxiliando assim, processos cada vez mais eficientes. Tais aplicações específicas foram possíveis através do desenvolvimento de novas ligas metálicas.

Os materiais metálicos podem ser divididos em dois grandes grupos segundo sua composição química: metais ferrosos e metais não ferrosos. Ademais, dentre as ligas não ferrosas, consta-se da literatura que foi desenvolvida, na década de 1960, a liga de NiTi, conhecida comercialmente como Nitinol. [1]

Após sua invenção, com o passar dos anos, dada suas propriedades peculiares, houve uma crescente necessidade de novos estudos sobre tais ligas metálicas. Nesse contexto, foram aprimoradas umas das principais características especiais presentes nas ligas de NiTi: o Efeito de Memória de Forma (EMF) e superelasticidade (SE).

Materiais metálicos com Efeito de Memória de Forma, conhecidos como SMAs, do inglês (*Shape Memory Alloys*), são aqueles capazes de recuperarem o seu estado inicial após serem sujeitos a deformações e em sequência aquecidos adequadamente. Tal fenômeno pode ser induzido por condições específicas de temperatura ou tensão.

Do ponto de vista metalográfico, tal recuperação está relacionada às transformações martensíticas que conferem mudanças reversíveis na estrutura cristalina do material com o aquecimento.

A superelasticidade é outra característica advinda das transformações de fase. Quando um material é submetido a um carregamento, ele pode sofrer grandes deformações, podendo chegar até 8%, muito acima do limite convencional de elasticidade das ligas metálicas, causando um escoamento aparente característico da transformação martensítica [2].

Assim, a capacidade de retornar a um estado inicial após o alívio deste carregamento, ou seja, com a transformação reversa para microestrutura austenítica, nomeia um material superelástico.

Outra característica singular e muito importante da liga Nitinol é sua biocompatibilidade. Tal fato, acrescido da elevada resistência à corrosão, permite sua aplicação na odontologia, mais especificamente em fios aplicados à aparelhos ortodônticos [3] e, na medicina, em materiais ortopédicos, instrumentos endoscópicos e *stents* endo vasculares. [4]

## 1.1 OBJETIVO

Nesse contexto, no presente trabalho, de tema “Estudo numérico de dano e recuperação de Chapas Metálicas com Efeito de Memória de Forma para a Utilização na Indústria” foi analisado, através de um modelo numérico, o comportamento de uma placa de Nitinol submetida à carregamentos pontuais de baixa velocidade e sua capacidade de recuperação geométrica a partir de um carregamento térmico adequado.

Além disso, foram realizados ensaios experimentais a partir de um corpo de prova retangular de 100 mm de altura, 100 mm de comprimento e 0,3 mm de espessura, em fase martensítica à temperatura ambiente e suas possíveis aplicações industriais.

A modelagem numérica permitiu realizar comparações entre o comportamento do material em uma aplicação experimental com este modelo matemático desenvolvido. Para estas simulações, utilizou-se o Software ANSYS® para análises em Elementos Finitos, o que permitiu a realização de simulações de diferentes geometrias, gerando uma maior quantidade de resultados e podendo abranger maiores aplicações.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No que tange o desenvolvimento tecnológico, é notória a necessidade de expansão do conhecimento aprofundado de ligas com efeito de memória de forma, como o Nitinol.

Tendo em vista ainda sua vasta aplicabilidade, o conhecimento consolidado de suas propriedades termomecânicas, como a alta resistência à corrosão e longo período de aplicação permitiria sua utilização em grande escala na indústria nacional.

O presente tema, portanto, foi escolhido devido à alta potencialidade de aplicação dos SMA na indústria, face ao seu pouco aproveitamento no Brasil.

Espera-se, com isso, um impacto benéfico na utilização de chapas de Nitinol na indústria, sobretudo setor automobilístico, como alternativa ou melhoria de problemáticas que envolvam impactos de baixa velocidade e baixa carga mecânica, como por exemplo, pequenas deformações causadas por chuvas de granizo ou queda de objeto no teto dos carros.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Este trabalho foi dividido em oito capítulos. O primeiro, trata-se de uma breve introdução ao tema escolhido para abordar os principais aspectos que serão discutidos e aprofundados ao longo do texto. Além disso, foram apresentadas as justificativas e objetivos específicos que motivaram este estudo.

No segundo capítulo será tratada a revisão bibliográfica, com o objetivo de posicionar o trabalho proposto no estado da arte de estruturas inteligentes, discorrendo sobre o efeito memória de forma, para dar a pesquisa um maior embasamento teórico e maior capacidade de análise aos autores.

O capítulo terceiro irá desenvolver a respeito das aplicações do material de estudo, mostrando as utilizações existentes atualmente e a evolução do uso das ligas com memória de forma.

No quarto capítulo foi desenvolvido um modelo constitutivo, afim de fundamentar matematicamente o efeito de memória de forma utilizado no software de análise ANSYS®.

No quinto capítulo, serão apresentadas as metodologias de estudo utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, tais como as análises realizadas e os resultados obtidos. Serão também comparados os dados de cada análise realizada, avaliando os resultados obtidos experimental e computacionalmente.

Sequentemente, no sexto capítulo, serão apresentados alguns trabalhos futuros para os quais o objeto de estudo deste trabalho pode ser aplicado, com base nos testes numéricos e experimentais, mais especificamente, na funilaria de automóveis.

No sétimo capítulo, assim, serão apresentadas as conclusões do estudo e as considerações finais a respeito do tema proposto. No oitavo capítulo, por fim, serão indicadas as referências bibliográficas.

## 2 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

A união de dois ou mais elementos químicos, com características pré-selecionadas, destacam a capacidade das ligas metálicas de serem ajustadas quanto às propriedades mecânicas de acordo com a aplicação de destino.

Algumas ligas metálicas, por sua vez, podem ser “treinadas” e “manipuladas” para se adaptarem reversivelmente à diferentes situações de estímulos, sobretudo quanto à sua geometria. Tal característica, portanto, as definem como materiais inteligentes.

Dentre os materiais inteligentes, existem as Ligas com Memória de forma (LMF) que têm a capacidade de retomar sua forma inicial após a aplicação de uma carga mecânica externa seguida de uma variação de temperatura adequada ou quando submetidas a determinados ciclos termomecânicos.

O primeiro relato do fenômeno relacionado à memória de forma em ligas metálicas foi testemunhado em 1932 na liga Au 47,5%Cd, em 1932. Neste material, notou-se a possibilidade de deformação “plástica” com o esfriamento e o retorno às configurações iniciais após aquecimento subsequente. [11]

Este comportamento foi comparado ao efeito de uma borracha e, conseqüentemente chamado de *rubberlike*. Tal efeito foi associado ao envelhecimento ou estabilização da martensita em uma determinada temperatura. Posteriormente, em 1938, este efeito também foi observado na liga CuZn. [14]

Anos depois, em 1962, no Laboratório de Material Bélico Naval (*Naval Ordnance Laboratory*), no Estado de Maryland nos EUA, foi observado por Willian Buehler, o Efeito de memória de forma numa liga de Níquel e Titânio, aproximadamente equiatômica, também conhecida como Nitinol. Em 1970, descobriu-se que o mecanismo cristalográfico que trazia o EMF ao NiTi era o mesmo observado na liga AuCd. [13]

Neste cenário, os conceitos de Efeito de Memória de Forma e Superelasticidade foram introduzidos e, a partir do desenvolvimento de estudos microscópicos e macroscópicos, percebeu-se que estas características especiais são oriundas de transformações martensíticas reversíveis.

Com isso, notou-se, também, a grande capacidade dessas ligas em diversas aplicações. A liga com EMF mais comercializada atualmente é o Nitinol, especialmente pela sua alta biocompatibilidade, excelentes propriedades mecânicas e menor custo diante das ligas existentes no mercado. [10]

Na engenharia, a liga NiTi é a mais utilizada para diversos equipamentos, tais como acoplamentos, sensores, em fios, chapas ou tubos. Na área da saúde, são utilizados em implantes ortodônticos, próteses e *stents*. [19,20]

Nos subcapítulos seguintes serão aprofundadas como ocorrem as transformações martensíticas provocadas por tensão e alterações de temperatura, bem como as consequências que caracterizam o Nitinol como um material inteligente: o Efeito de memória de forma e a Superelasticidade (ou pseudoelasticidade).

## 2.1 TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS NAS LIGAS DE NITI

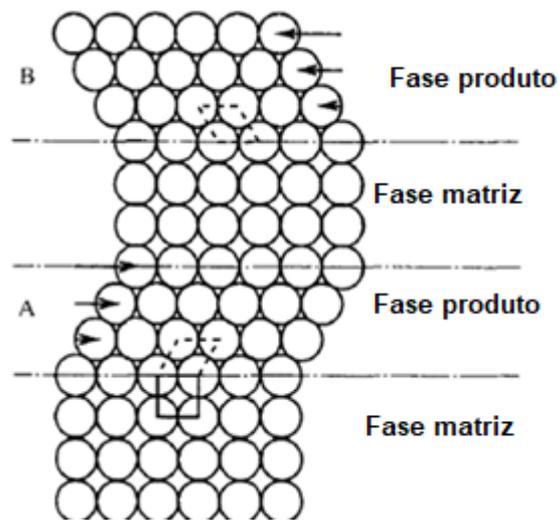
As transformações martensíticas, ocorrentes no estado sólido, podem ser classificadas como transformações não difusivas, ou seja, quando não há alteração de composição química na nova fase, diante da fase em que esta foi formada. [5] Esta transformação, portanto, ocorre através de movimentações coordenadas e em velocidades muito elevadas, geralmente causada por um processo semelhante ao cisalhamento. [6]

A transformação martensítica, que pode ser reversível, ocorre entre as fases martensítica e austenítica através de carregamentos térmicos e mecânicos adequados. Por esta razão, tais transformações são chamadas de transformações termomecânicas. Vale ressaltar que os conceitos de altas e baixas temperaturas variam consideravelmente com a composição e tipo de tratamento térmico e metalúrgico que as mesmas receberem previamente.

A fase austenítica pode ser descrita como uma fase estável e organizada sob temperaturas elevadas e tensões baixas. Já a fase martensítica, é menos organizada e estável somente quando em baixas temperaturas e altas tensões.

A fase martensítica, pode ser considerada uma fase estável com a ausência de tensão e sua formação ocorre por nucleação e crescimento. Assim, dependendo do tipo de transformação na qual a liga for submetida, devido à sua instabilidade, a fase pode assumir diversas estruturas cristalinas.

Estas duas fases são reversíveis e fazem com que as ligas com EMF se comportem de maneira distinta em altas e baixas temperaturas. O exemplo de transformação martensítica pode ser representado na Figura 1 a seguir, na qual a fase matriz é a fase austenítica e a fase produto é a fase martensítica.



**Figura 1 - Modelo Simplificado da transformação martensítica**

**Fonte: Adaptado de OTSUKA; WAYMAN, 1998, p.3 [7]**

A Figura 1 mostra uma relação da transformação martensítica de acordo com a temperatura. Quando a temperatura do sistema é reduzida até um ponto crítico, a partir da região B, inicia-se a reorientação da fase martensítica, através do mecanismo de cisalhamento. Pode-se afirmar que a martensita da região A e B possuem a mesma estrutura cristalina, porém, com orientações distintas.

Quanto às transformações de fase, partir do aumento da temperatura, a martensita torna-se instável e a fase austenítica, estável, e, portanto, ocorre a transformação de fase. Caso essa transformação também seja reversível do âmbito cristalográfico, a martensita reverte-se à sua fase original, também com a orientação cristalográfica original. [7]

### 2.1.1 Influência da Temperatura

Conforme já mencionado, as transformações martensíticas podem ocorrer diante de alterações de temperatura e por aplicação de carregamentos mecânicos a temperaturas adequadas. Diante deste cenário, nota-se a importância da temperatura na caracterização de uma liga com EMF.

A Figura 2 mostra, resumidamente, a transformação de fase em função da temperatura e, também, a inclusão de pontos críticos característicos de todas as ligas com EMF.

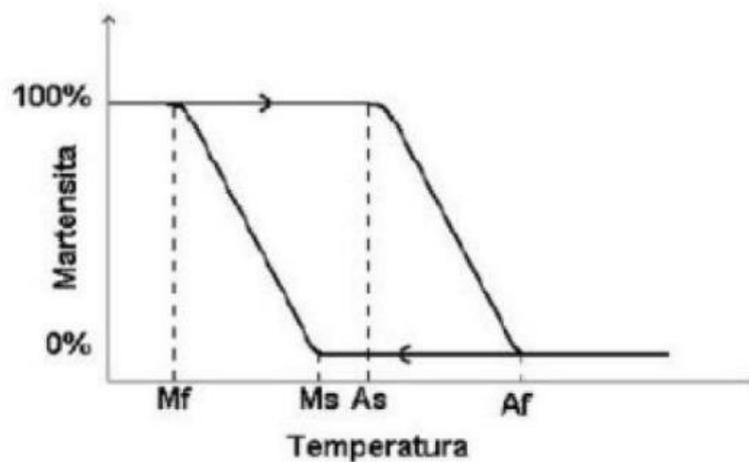


Figura 2 - Transformação de fase em função da temperatura

Fonte: Oréfica, Pereira e Mansur, 2012

Dessa forma, pode-se descrever os seguintes pontos do gráfico acima:

- $M_s$ : Temperatura na qual inicia-se o processo de transformação da austenita em martensita;
- $M_f$ : Temperatura na qual finaliza-se o processo de transformação da austenita em martensita;
- $A_s$ : Temperatura na qual inicia-se a transformação reversa de martensita para austenita;
- $A_f$ : Temperatura na qual finaliza-se a transformação reversa de martensita para austenita.

Como exposto acima, a transformação martensítica não ocorre através de difusão de átomos, e sim através da distorção da rede cristalina por cisalhamento. Quando a austenita está sendo transformada em martensita, os cristais martensíticos nucleiam e crescem em diferentes orientações, nas quais são chamadas de variantes. [12]

Estas variantes podem se arranjar de até 24 formas (variantes), sendo duas delas as mais estáveis, chamadas de martensita maclada ( $M^t$ ) martensita não maclada ( $M^d$ ). A primeira é formada através da combinação de cristais martensíticos de diferentes variantes e a martensita não maclada é formada somente por uma única variante.

A Figura 3 abaixo demonstra a transformação de fase induzida pela mudança de temperatura com ausência de tensões. É possível notar a transformação de martensita maclada para a fase austenítica, após a temperatura ultrapassar os pontos críticos  $A_f$  e  $A_s$ . Por outro lado, pode-se observar também, a transformação reversa após a ultrapassagem das temperaturas críticas  $M_s$  e  $M_f$ .

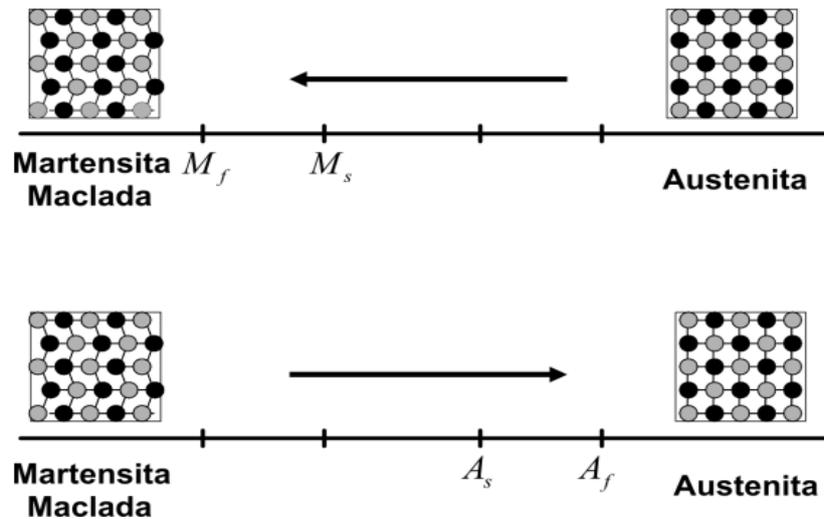


Figura 3 - Transformação de fase induzida por temperatura sem carregamento

Fonte: Adaptado de LAGOUDAS e KUMAR [8]

O aumento da temperatura pode ocorrer de duas formas, com ou sem a presença de carga mecânica. No caso da Figura 3, este aumento ocorre sem a presença de carregamento e o material torna-se austenítico após o ponto  $A_f$ .

### 2.1.2 Influência de Carregamentos Mecânicos

Quando um carregamento mecânico de baixa intensidade é aplicado ao material na fase de martensita maclada, em baixas temperaturas, ocorre a formação da martensita demaclada. Esta “demaclação” resulta em uma mudança de forma reversível após a liberação da carga e a um subsequente aquecimento da liga. Esta transformação é demonstrada na Figura 5.

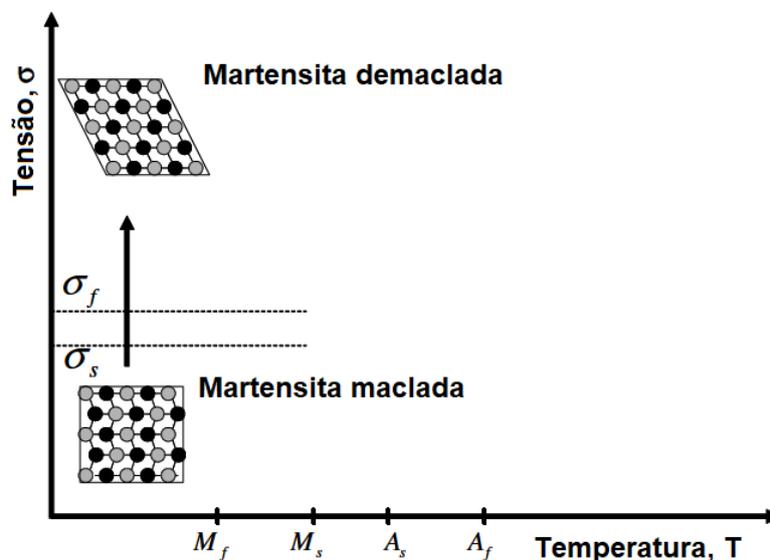


Figura 4 - Transformação de fase induzida por temperatura sem carregamento mecânico

Fonte: Adaptado de LAGOUDAS e KUMAR [8]

Caso o aumento de temperatura supere o ponto crítico  $A_f$ , com a presença de carregamento, ocorre a transformação reversa, da martensita demaçada para a austenita, caracterizando a recuperação total da forma inicial da liga, conforme ilustrado na Figura 5.

Contudo, um resfriamento abaixo da temperatura  $M_f$  reinicia o ciclo para a formação de martensita maclada. Tal efeito pode ser observado na Figura 5 que, além disso, inclui os pontos  $M_f^\sigma$ ,  $M_s^\sigma$ ,  $A_f^\sigma$  e  $A_s^\sigma$ , que marcam o início e o fim das transformações de fases dadas pela aplicação da carga  $\sigma_s$ .

Neste caso, o material está sendo resfriado com uma carga mecânica ( $\sigma_f$ ) maior do que a carga aplicada durante a fase austenítica ( $\sigma_s$ ). Nesse contexto, a fase austenítica resultará na formação de martensita demaçada, resultando, assim, na mudança de forma.

O reaquecimento do material, no entanto, caracteriza a transformação reversa de austenita para martensita demaçada que acontecem no intervalo de  $M_s$  para  $M_f$  e de  $A_s$  para  $A_f$ .

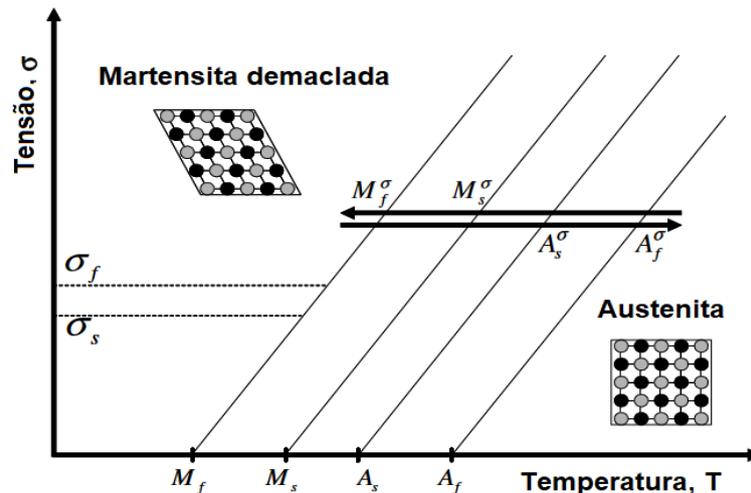


Figura 5 - Transformação de fase induzida por temperatura com carregamento mecânico

Fonte: Adaptado de LAGOUDAS e KUMAR [8]

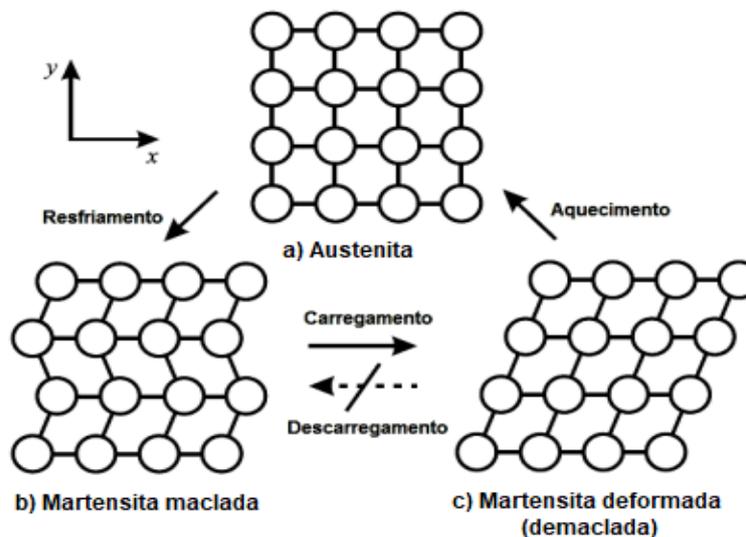
É importante citar que tanto carregamentos de tensão ou compressão influenciam nas temperaturas de transformação, ou seja, quanto maior o carregamento, maiores as temperaturas de transformação direta e reversa. Conclui-se, portanto, que as temperaturas de transformação direta e reversa dependem fortemente da intensidade da carga aplicada ao material. [1]

## 2.2 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

O efeito memória de forma (EMF) ocorre através da transformação microestrutural do material. Quando submetemos a liga à uma determinada tensão, durante a fase martensítica e abaixo da temperatura  $A_s$ , a geometria é reorganizada, dando início ao processo de demaçoção.

Devido à baixa simetria da martensita, existem diversas maneiras pelas quais esta fase pode ser formada a partir da fase austenítica. Entretanto, há somente uma maneira de ocorrer a transformação reversa: através de tratamento térmico. [8]

O modelo acima descrito pode ser exemplificado na Figura 6.

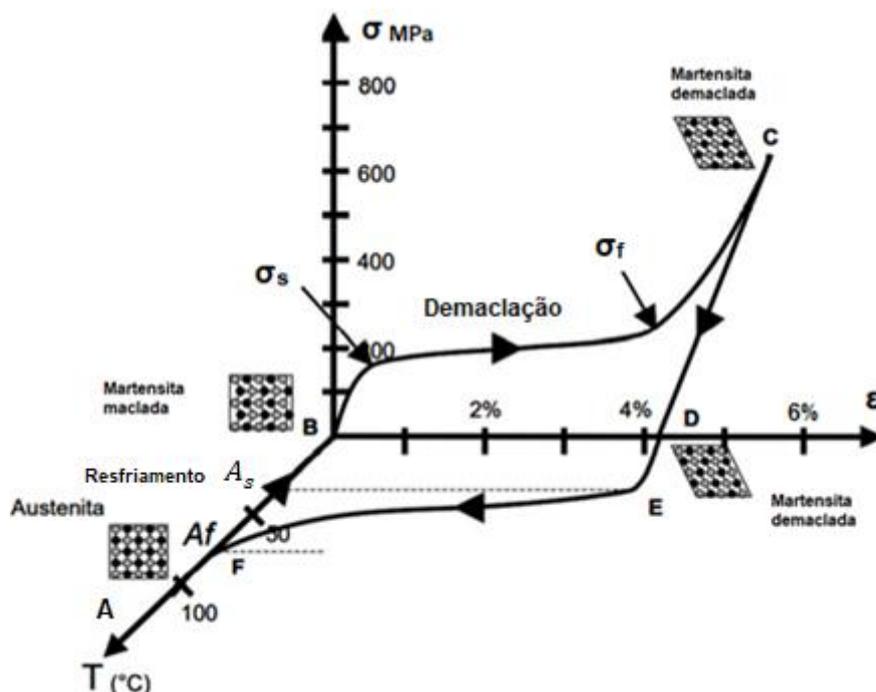


**Figura 6 - Transformação de fase austenita para martensita maclada e demaclada por ação de temperatura com carregamento**

**Fonte: Adaptado de LAGOUDAS e KUMAR [8]**

Quando uma liga é submetida a um carregamento em uma temperatura abaixo da  $A_f$ , ou seja, quando sua fase se apresenta como martensita maclada, o material sofre deformações. No entanto, caso seja subsequentemente aquecido a um ponto acima desta mesma temperatura, a deformação é recuperada e o material retorna novamente à fase austenítica caracterizando, assim, o Efeito de Memória de forma. [8]

A natureza do EMF pode ser melhor compreendida seguindo o caminho de carregamento termomecânico em um espaço combinado de tensão-deformação-temperatura. Abaixo, a Figura 7 representa dados experimentais para uma amostra típica de NiTi testada sob carga uniaxial.



**Figura 7 - Ciclo de Efeito de Memória de Forma Unidirecional**  
**Fonte: Adaptado de LAGOUDAS e KUMAR [8]**

O ponto A representa o material em sua fase austenítica inicial que, ao ser resfriado sem submissão de tensão, altera a microestrutura para martensita maclada, atingindo o ponto B no gráfico. Em seguida, o material é carregado mecanicamente gradativamente sem variação de temperatura, resultando no início de sua deformação elástica (representada na figura pelo trecho entre os pontos B e C). Ao longo deste processo, ocorre a demaciação e, conseqüentemente, a reorientação da fase martensítica.

A partir do ponto C inicia-se o processo reversivo no qual é feito o descarregamento das tensões aplicadas. É notório que, apesar de completamente descarregado, o material no ponto D ainda apresenta um percentual de deformação residual. Para que o material retorne ao seu estado inicial, é necessário que haja a transformação reversa através do aquecimento do material, iniciada ao atingir a temperatura  $A_s$  (no ponto E). O material é então aquecido até atingir a temperatura  $A_f$  (ponto F), onde retorna à fase austenítica e ao estado original.

O ciclo descrito é conhecido como efeito de memória de forma unidirecional, visto que o retorno às condições iniciais de deformação de um determinado material, após ser submetido à um carregamento, depende da variação de temperatura.

### 2.3 SUPERELASTICIDADE

A superelasticidade ou pseudoelasticidade pode ser definida como o fenômeno na qual uma liga deformada sob tensão, à uma temperatura acima da  $A_f$  da Figura 7 e abaixo da temperatura crítica, possui a capacidade de se recuperar após o descarregamento. Tal efeito permite o material sofrer grandes deformações, até mesmo acima do seu limite convencional de elasticidade e, após isso, retornar sua forma original. [7]

O fenômeno da superelasticidade nos materiais com EMF inicia-se a uma temperatura suficientemente alta onde há a presença da fase austenítica. A partir de uma determinada tensão, a austenita é transformada gradualmente a um estado em que a martensita é estável. Após finalizado o carregamento, a fase martensítica deixa de ser estável e ocorre a transformação inversa.

A Figura 8 da próxima página esquematiza o comportamento tensão-deformação nestas ligas. Diante da aplicação de uma carga, a fase austenítica sofre um carregamento elástico ( $A \rightarrow B$ ) e inicia-se a transformação martensítica, marcando o ponto  $\sigma^{Ms}$ .

A transformação martensítica induzida por tensão acompanha a geração de grandes deformações conforme mostrado na Figura 8. A transformação alcança o nível  $\sigma^{Mf}$  ( $B \rightarrow C$ ), e assim, termina a transformação direta de austenita para martensita.

Quando ocorre um aumento da tensão, ocorre a deformação elástica da martensita demarcada ( $C \rightarrow D$ ). Com a liberação da carga, há um descarregamento elástico da martensita ( $D \rightarrow E$ ) e, assim, inicia-se a transformação reversa a partir do ponto  $\sigma^{As}$ . Com isso, após o descarregamento, ocorre a recuperação da deformação causada pelo carregamento.

Pode-se afirmar que o fim da transformação está associado à descarga, caracterizando o ponto de tensão  $\sigma^{Af}$ , correspondente ao ponto F. Após isso, o material descarrega elasticamente até o ponto A.

É importante citar, por fim, que tanto a transformação direta quanto a transformação reversa durante o fenômeno pseudoelástico completo resulta em uma histerese. Esta, por sua vez, representa a energia que é dissipada durante os ciclos de transformação.

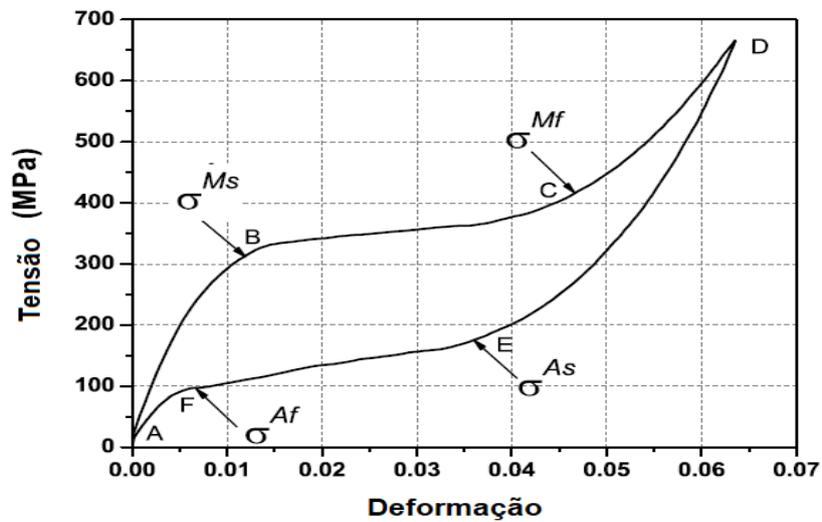


Figura 8 - Ciclo de carregamento elástico em ligas com EMF

Fonte: adaptado de LAGOUDAS e KUMAR [8]

### 3 APLICAÇÕES

O Efeito Memória de Forma já havia sido descoberto na década de 1930, entretanto, as aplicações de tais materiais só foram desenvolvidas a partir do estudo das ligas NiTi em 1963.

O Nitinol é a LMF com maior aplicabilidade atualmente, com propriedades termomecânicas muito superiores quando comparado à outras ligas. Dentre estas, pode-se destacar alto percentual de deformação reversível, alta capacidade de absorção de energia, resistência à corrosão e sua excelente biocompatibilidade. [15]

Outra liga comercialmente importante com EMF é a CuZnAl. No entanto, quanto às propriedades mecânicas, percebe-se que o NiTi possui um percentual de deformação recuperável duas vezes maior que o CuZnAl, assim como a tensão gerada na recuperação. [15]

#### 3.1 APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL

A primeira aplicação comercial da liga NiTi ocorreu em 1965, quando foi desenvolvido um acoplamento para tubos hidráulicos, conhecidos como *cryofit*, utilizado em aeronaves de combate, representado na Figura 9 abaixo.

Inserir os tubos depois de expandir o acoplador

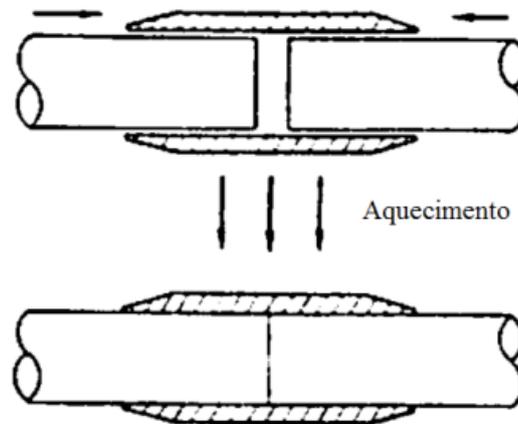


Figura 9 - Acoplador de tubos de NiTi

Fonte: ANTÔNIO, E.; COURA, N. (2016)

Este dispositivo funciona através de alterações de temperatura, na qual a partir de sua expansão, aquece-se o material para que ele retorne à sua forma original e, assim, o tubo seja fixado. [20]

Entretanto, a temperatura de transformação deste material demasiadamente baixa, sendo necessário transportar o nitrogênio líquido para evitar que a atuação ocorresse antes da montagem. Tal problemática foi solucionada em 1989 com a adição de nióbio a liga, que a tornou mais fácil de se manusear devido à maior histerese de temperatura obtida. [8]

Além disso, no setor aeroespacial, as ligas com EMF têm sua aplicação cada vez mais promissora, especialmente nos acionamentos (*flaps*) sendo utilizado para melhorar o controle de aeronaves em manobras. Os *flaps* são instalados na parte superior das asas das aeronaves e promovem o balanceamento de altitude e a mudança de direção.

Essas estruturas possuem alto custo no projeto da aeronave devido à complexidade do sistema acoplado ao seu funcionamento. A utilização de materiais inteligentes possibilitaria, portanto, a eficiência do projeto dessas aeronaves quanto ao custo e peso. [20]

### 3.2 APLICAÇÕES NA ODONTOLOGIA

Na década de 1970, começaram a ser desenvolvidas aplicações das ligas NiTi na ortodontia. Os fios ortodônticos de outros materiais, como por exemplo o aço inoxidável, foram substituídos pelos fios de Nitinol. Tal substituição foi de extrema importância na eficiência dos aparelhos ortodônticos, tendo em vista que anteriormente, necessitava-se da aplicação de muita força para pouca movimentação da arcada dentária. [16] A Figura 10 abaixo demonstra a utilização de fios de Nitinol na odontologia.



**Figura 10 - Utilização de fios ortodônticos de NiTi**

**Fonte: CARDOSO, C. et al. (2009)**

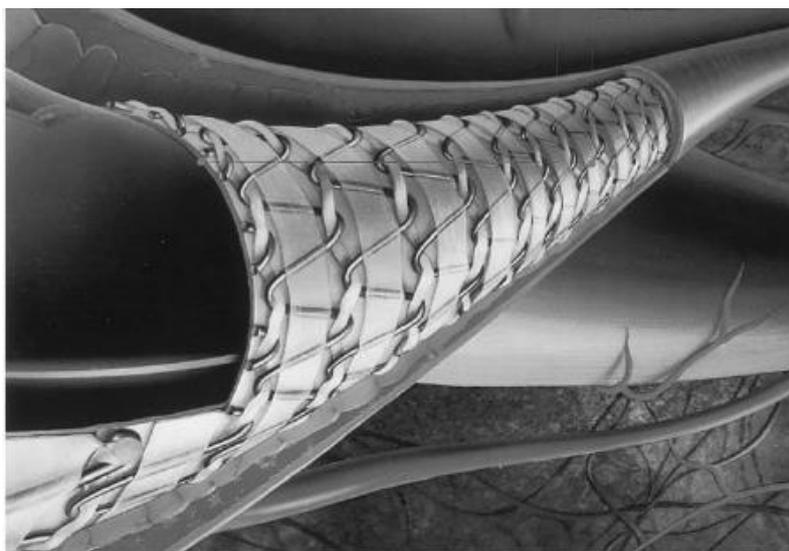
### 3.3 APLICAÇÕES NA MEDICINA

Na medicina, grande avanço da utilização do Nitinol teve início a partir do ano de 1990 com o desenvolvimento de *stents*. Esses materiais, são utilizados nas artérias com o objetivo de mantê-las abertas para evitar seu entupimento e obstrução. Inicialmente eram produzidos a partir de cerâmicas, materiais compósitos, polímeros e aço inoxidável.

Devido à alta compatibilidade, alta resistência à corrosão, alta conformabilidade e propriedades de memória de forma, a utilização do NiTi em

*stents* proporcionou grandes avanços na cardiologia e, isso ocorre devido à maior facilidade de penetração no corpo humano.

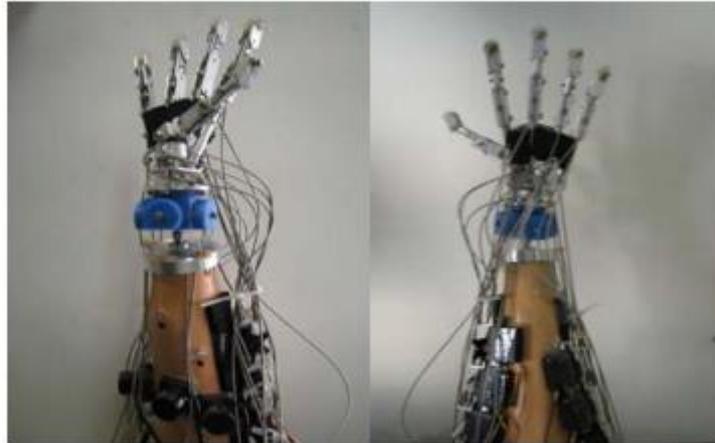
À temperatura ambiente (20°C), os *stents* de Nitinol, representado na Figura 11, apresentam um diâmetro menor e expandem-se ao serem inseridos no corpo humano devido a um aquecimento até a temperatura média corporal (37°C). Após isso, retornam à sua geometria pré-definida para performarem da forma esperada. [17]



**Figura 11 - Representação de um stent de NiTi**

**Fonte: MOHD JANI, J. et al (1999)**

Outra aplicação em estudo da biomedicina vincula os materiais com EMF à robótica. Nesta aplicação, conforme a Figura 12, são realizadas simulações do movimento dos tendões musculares para mãos robóticas utilizando a capacidade de atuação e dilatação térmica dos fios de NiTi através do efeito joule, conforme representa a Figura 12 abaixo. [18]



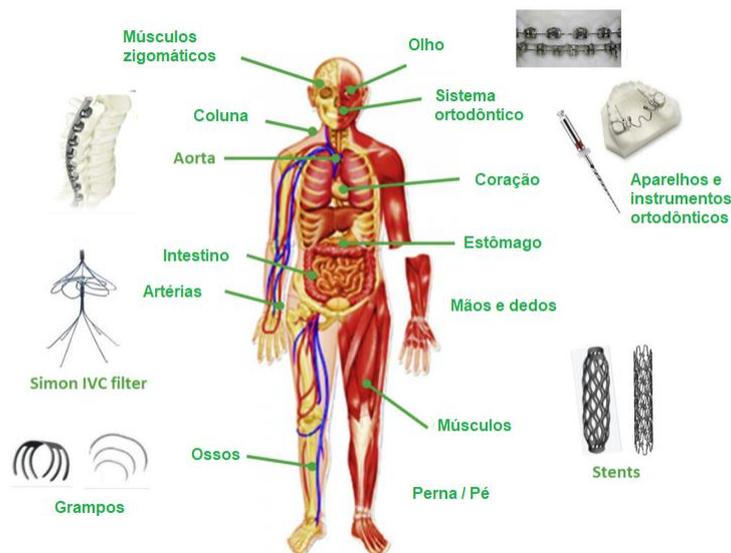
**Figura 12 - Simulação de tendões robóticos acionados por NiTi**

**Fonte: CHEE SIONG et al. (2009)**

Neste mecanismo, os fios de NiTi são submetidos à uma corrente elétrica, que provoca a dilatação térmica do fio, visto que conexões elétricas são capazes de manter múltiplos ciclos de conexão e desconexão. Ao passar pelo fio, a corrente estimula a transformação de martensita para austenita devido ao calor gerado. Tal processo caracteriza o funcionamento de um atuador elétrico. [18]

Ademais, as ligas a base de Níquel-Titânio apresentam a habilidade de gerar força de retorno. Tal propriedade, associada ao efeito memória de forma, a pseudoelasticidade a alta capacidade de amortecimento na fase martensítica e durante a transformação de fase, oferece um extenso potencial de aplicação em atuadores. [11]

A Figura 13 mostra de forma geral, a utilização das ligas com efeito de memória de forma na medicina. Isso demonstra o grande avanço destes materiais na área biomédica e, a partir do desenvolvimento dos estudos voltados à esta aplicabilidade, seu uso estendeu-se a diversas partes do corpo humano.



**Figura 13 - Aplicação do Nitinol no corpo humano**

**Fonte: Fonte: MOHD JANI, J. et al (1999)**

### 3.4 APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

No decorrer do tempo, a indústria automotiva passou a priorizar critérios como segurança, desempenho e conforto em seus produtos. À medida que a demanda por veículos mais modernos aumentou, consequentemente o interesse em desenvolver soluções otimizadoras elevou-se proporcionalmente.

Por conta disso, a liga Nitinol tem sido utilizada em diversas peças e acessórios, principalmente sensores e atuadores. Além disso, seu campo de aplicação expande-se à além desses materiais, o que tornou primordial o desenvolvimento de estudos a respeito deste tópico.

A capacidade de atuação associada ao EMF fez com que atuadores eletromagnéticos tornassem-se obsoletos haja vista os dispositivos constituídos por NiTi. O uso deste material implica em diversas vantagens aos automóveis, tais como redução de peso, tamanho, emissão acústica e tempo de atuação.

A Tabela 1 abaixo compara parâmetros de dois tipos diferentes de acionamento de palhetas do condicionador de ar de um veículo: um motor e um atuador de Nitinol.

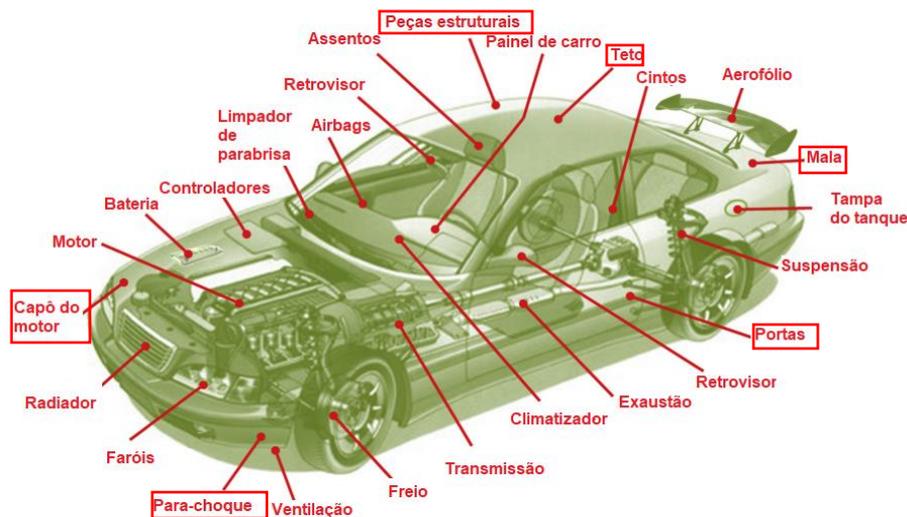
Tabela 1 - Comparação entre atuadores DC e de NiTi

Parâmetros	Motor DC	Atuador de NiTi
Tempo de atuação	3 s	2-3 s
Espaço ocupado	Compacto	Volume de um fio
Emissão acústica	Baixo ruído	Sem ruído
Complexibilidade mecânica	Alta	Baixa
Massa	~65 g	~20 g
Precisão de posicionamento	$\pm 1,5^\circ$	$\pm 2,25^\circ$
Energia consumida	1 W	1 W

Fonte: Adaptado de MOHD JANI, J. et al (1999)

Além desta aplicação, a liga NiTi é utilizada nas travas de segurança das portas, em válvulas de controle térmico, no sistema de lubrificação, embreagens, dentre outros. Ainda neste sentido, as ligas com EMF tornam-se uma opção mais adequada quando comparada a diversos sistemas eletropneumáticos e eletromagnéticos.

Outros critérios levados em consideração na indústria automotiva são a estética e aerodinâmica. A Figura 14 abaixo representa algumas partes com potencial de aplicação de ligas com EMF à base de NiTi e dispositivos em um veículo para passageiros, destacando as peças de maior interesse da aplicação deste estudo.



**Figura 14 - Potencial aplicação do Nitinol em automóveis**

**Fonte: Adaptado de MOHD JANI, J. et al (1999)**

### 3.5 DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÕES

Segundo a multinacional General Motors (GM), desde a década de 1990 a empresa desenvolve pesquisas a respeito da utilização das LMF em seus carros, chegando a registrar 247 patentes de 1990 até 2013. Algumas das aplicações desses estudos são encontradas no fechamento da tampa do porta-malas, em um gerador capaz de transformar o calor de exaustão em energia elétrica, na abertura das portas dos veículos e em diversos sensores. [11]

Embora existam muitas oportunidades de aplicação da liga NiTi, ainda há muito a ser estudado a respeito deste material. Além de uma certa dificuldade econômica, existem alguns desafios técnicos a ser superados, sendo o principal deles a limitada faixa de temperatura de transformação do Nitinol.

Para desenvolver este material à uma aplicação, deve-se também levar em consideração a vida útil, a largura de histerese e a estabilidade, visto que tais critérios implicam diretamente no desempenho e na segurança do veículo.

Nesse contexto, o Nitinol pode ser aplicado em operações onde as condições de temperatura de serviço variam entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e a maior parte das aplicações deste material enquadram-se neste cenário.

Um dos desafios a ser superado pela engenharia é desenvolver soluções para a utilização deste material em locais que operam fora desta faixa

de temperatura, como o capô do carro, por exemplo. Além de ficar sob o motor, soma-se o fato de ser uma peça externa sujeita ao calor do ambiente e às condições climáticas.

Em países como a Rússia, por exemplo, a média de temperatura no inverno varia de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $-69\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; já no Catar, as temperaturas máximas chegam em média a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 15 abaixo, retrata a aplicabilidade das ligas a base de níquel-titânio e suas respectivas faixas de temperaturas de transformação. Na imagem, as linhas tracejadas em vermelho representam a temperatura máxima de operação do Nitinol comercial.

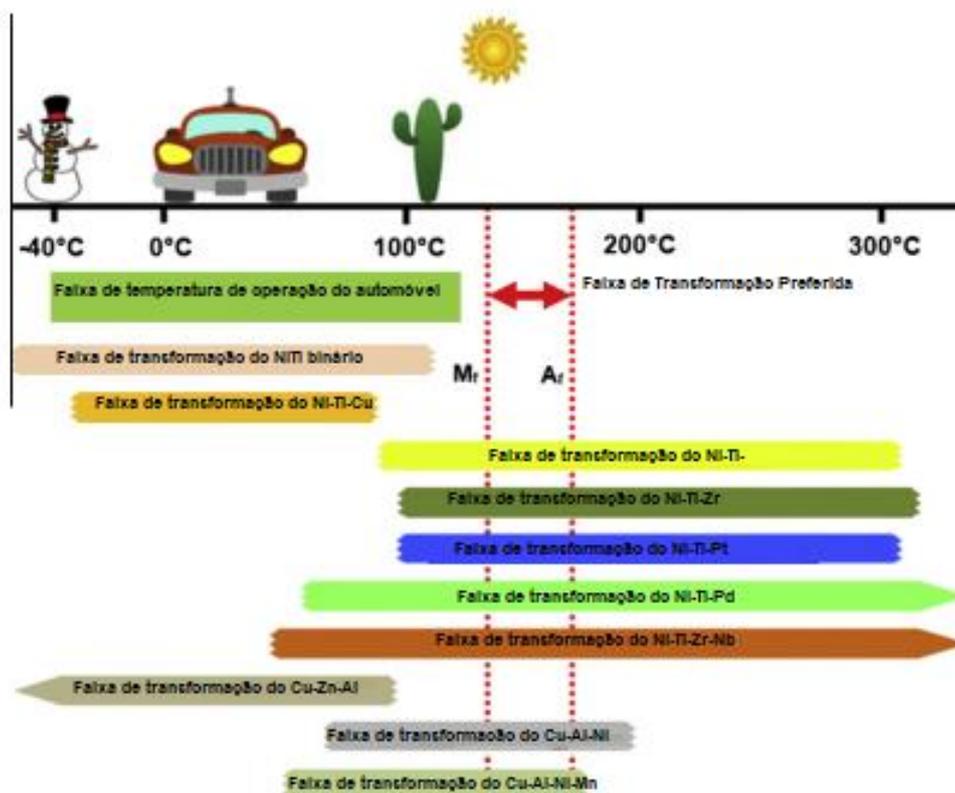


Figura 15 - Faixas de temperatura para aplicação em ligas de NiTi

Fonte: Adaptado de MOHD JANI, J. et al (1999)

Embora as ligas de CuAlNi se sobressaiam nesse critério, as mesmas possuem parâmetros insatisfatórios para a aplicação em outras propriedades mecânicas. Da mesma maneira, as ligas NiTi para altas temperaturas (HTSMAs)

apresentam bom desempenho, todavia possuem valor agregado bem mais caro que o Nitinol.

Em suma, uma opção de estudo para aplicação da liga NiTi no setor automotivo a ser desenvolvido diz respeito ao teto do carro. Esta peça, assim como o capô, fica exposta ao ambiente externo, sujeita a variações climáticas. No entanto, não possui a problemática de estar próxima ao motor ou a outra fonte geradora de calor do próprio veículo. Sendo assim, a análise limita-se ao estudo do comportamento do material em uma faixa específica de temperatura.

No Brasil, por ser um país tropical, ocorre ainda, no verão, o fenômeno conhecido como chuva de granizo, onde pequenas pedras de gelo atingem, principalmente, o teto e o capô do carro.

Levando em consideração a capacidade de recuperação do Nitinol, torna-se viável o estudo da viabilidade de utilização desta liga no teto de automóveis, a princípio com impactos pontuais neste material com objetivo de analisar seu comportamento subsequente a variações de temperatura e sua capacidade de recuperação devido ao Efeito de Memória de Forma.

## 4 MODELO CONSTITUTIVO

O presente capítulo discorre brevemente sobre a modelagem matemática do Efeito de Memória de Forma utilizado no software ANSYS®. [19]

### 4.1 MODELO CONSTITUTIVO PARA MODELAGEM DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Normalmente, os modelos constitutivos são utilizados com o intuito de reproduzir, interpretar e prever o comportamento mecânico ou termomecânico de um determinado material.

No caso das SMA, o modelo representa o comportamento termomecânico do material, que por sua vez, é o principal motivo do crescimento no desenvolvimento desses modelos matemáticos.

O termomecânico das SMA pode ser analisado sob três óticas, que são: microscópica – a nível molecular – e macroscópica [8], e, por fim, a mesoscópica – partículas de estrutura cristalina [18].

A modelagem termomecânica macroscópica tem base nas características fenomenológicas do material, que a partir da consideração das mudanças microestruturais devidas à transformação de fase, relacionam a termodinâmica com variáveis de estado internas [8]

Este é um modelo fenomenológico que assume um regime de pequenas deformações [19] [24]. Nesse caso a densidade de energia livre pode ser descrita como:

$$\Psi(\theta, \epsilon, \epsilon^{tr}, T) = \frac{1}{2}K\theta^2 + G\|\epsilon - \epsilon^{tr}\|^2 + \beta(T - T^*)^+ \|\epsilon^{tr}\| + \frac{h}{2}\|\epsilon^{tr}\|^2 + \tau_{\epsilon_L}(\epsilon_{tr}) \quad (4.1)$$

Onde:  $\theta = tr(\epsilon)$  e  $\epsilon$  são respectivamente as partes volumétricas e desviadoras do tensor de deformação  $\epsilon$ , enquanto  $\epsilon^{tr}$  é a deformação associada à transformação de fase;  $K$  e  $G$  são os módulos de compressibilidade e de

cisalhamento, respectivamente;  $\|\cdot\|$  é a norma e  $(\cdot)^+$  é a parte positiva da função;  $\beta$  é um parâmetro do material relacionado à dependência entre tensão crítica e a temperatura,  $T^*$  é a temperatura de referência abaixo da qual somente a fase martensítica é estável, e  $h$  é uma propriedade do material relacionada ao endurecimento do material durante o processo de transformação de fase. Por fim,  $\tau_{\varepsilon_L}$  é uma função indicatriz utilizada para satisfazer as restrições na norma da deformação de transformação de fase.

$$\tau_{\varepsilon_L} = \begin{cases} 0 & \text{se } \|\epsilon^{tr}\| \leq \varepsilon_L \\ +\infty & > \varepsilon_L \end{cases} \quad (4.2)$$

Onde  $\varepsilon_L$  é um parâmetro do material associado ao valor máximo da norma da deformação de transformação de fase atingida durante um teste uniaxial. Vale salientar que na expressão proposta da densidade de energia livre nem os termos de expansão térmica e nem da variação de temperatura devido à transformação de fase são levados em consideração.

Seguindo a formulação de materiais padrão generalizado, são definidas agora derivadas da densidade de energia livre com relação às componentes volumétrica e desviadora do tensor de deformação e à deformação de transformação de fase, essas derivadas são chamadas de forças termodinâmicas:

$$\begin{cases} p = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = K\theta \\ s = \frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon} = 2G(\epsilon - \epsilon^{tr}) \\ \mathbf{X} = -\frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon^{tr}} = \mathbf{s} - \beta(T - T^*)^+ \frac{\epsilon^{tr}}{\|\epsilon^{tr}\|} - h\epsilon^{tr} - \gamma \frac{\epsilon^{tr}}{\|\epsilon^{tr}\|} \end{cases} \quad (4.3)$$

Onde  $p = tr(\sigma)/3$  e  $s$  são respectivamente as partes volumétrica e desviadora da tensão  $\sigma$  e  $\mathbf{X}$  é a força termodinâmica associada à deformação de

transformação de fase. A variável  $\gamma$  é resultado da função indicatriz relativa à sub-diferencial  $\partial\tau_{\varepsilon_L}(\epsilon^{tr})$  que é definida como:

$$\tau_{\varepsilon_L} = \begin{cases} \gamma = 0 & \text{se } \|\epsilon^{tr}\| < \varepsilon_L \\ \gamma \geq 0 & \text{se } \|\epsilon^{tr}\| = \varepsilon_L \end{cases} \quad (4.4)$$

Sendo:

$$\partial\tau_{\varepsilon_L}(\epsilon^{tr}) = \gamma \frac{\epsilon^{tr}}{\|\epsilon^{tr}\|} \quad (4.5)$$

Para a descrição da evolução da transformação de fase e do comportamento inelástico é definida a função  $F$ , como:

$$F(X) = \|X\| - R \quad (4.6)$$

onde  $R$  é o raio do domínio elástico (definição utilizada em plasticidade).

A partir do desenvolvimento do modelo define-se o fluxo da deformação de transformação de fase como:

$$\dot{\epsilon}^{tr} = \dot{\zeta} \frac{\partial F}{\partial X} = \dot{\zeta} \frac{X}{\|X\|} \quad (4.7)$$

Onde  $\dot{\zeta}$  é a variável interna responsável pela evolução da fração volumétrica da fase martensítica e para representar o caráter irreversível do processo de escoamento do material deve obedecer às condições de Kuhn-Tucker a seguir:

$$\begin{cases} \dot{\zeta} \geq 0 \\ F \leq 0 \\ \dot{\zeta} F = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

As tensões críticas de transformação de fase do modelo são calculadas através das seguintes fórmulas:

$$\sigma_i^{AM} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) + R] \quad (4.9)$$

$$\sigma_f^{AM} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) + R + h \|\epsilon^{tr}\|] \quad (4.10)$$

$$\sigma_i^{MA} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) - R + h \|\epsilon^{tr}\|] \quad (4.11)$$

$$\sigma_f^{MA} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) - R] \quad (4.12)$$

Sendo os sobre índices  $A$  e  $M$  referentes às fases austenítica e martensítica respectivamente,  $\sigma_i^{AM}$  e  $\sigma_f^{AM}$  são as tensões críticas de início e fim da transformação de fase de austenita para martensita e  $\sigma_i^{MA}$  e  $\sigma_f^{MA}$  as tensões críticas de transformação de fase de martensita para austenita.

#### 4.1.1 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

A Tabela 2 abaixo relaciona os parâmetros e suas respectivas propriedades, referentes ao modelo do ANSYS.

Tabela 2 - Parâmetros do Modelo do ANSYS

Parâmetro	Propriedade
$h$	Parâmetro de Dureza
$T^*$	Temperatura de Referência
$R$	Limite de elasticidade
$\beta$	Escala do Parâmetro de Temperatura
$\varepsilon_L$	Valor Máximo de $\ \epsilon^{tr}\ $
$E_m$	Módulo de Elasticidade da Martensita
$m$	Parâmetro de dependência de Lode

Fonte: Autor

A identificação dos parâmetros do modelo pode ser obtida através da comparação dos resultados de dois testes uniaxiais de ciclos térmicos realizados com tensão constante [21]

A Figura 16 abaixo demonstra uma relação entre a temperatura e sua consequente deformação para dois ciclos térmicos com tensões diferentes.

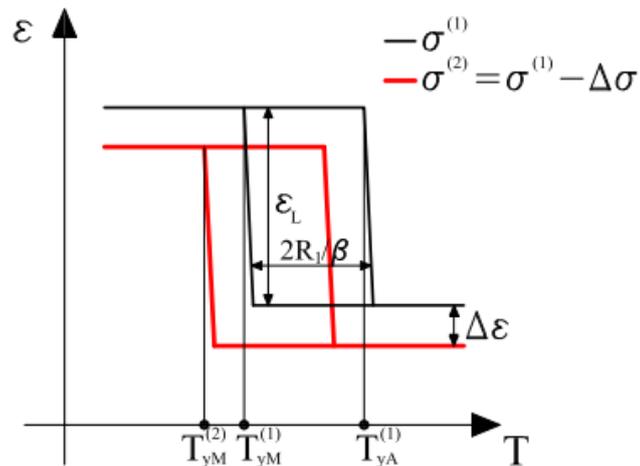


Figura 16 - Curva deformação x temperatura para dois ciclos térmicos com tensões Diferentes

Fonte: Autor

Através dos resultados experimentais obtêm-se o diretamente o valor de  $\varepsilon_L$ ,  $E$  e  $\beta$  pelas suas respectivas fórmulas:

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad (4.13)$$

$$\beta = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \quad (4.14)$$

Para a obtenção do limite elástico  $R$  é utilizada da equação a seguir:

$$R = \frac{\beta}{2} (T_{yA}^{(1)} - T_{yM}^{(1)}) \quad (4.15)$$

Onde  $T_{yA}^{(1)}$  e  $T_{yM}^{(1)}$  são mostrados na Figura 9. A determinação do parâmetro de endurecimento  $h$  é dada pela fórmula:

$$h = \frac{1}{\frac{1}{\beta} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} - \frac{1}{E}} \quad (4.16)$$

A temperatura de referência  $T^*$  é obtida pela relação a seguir:

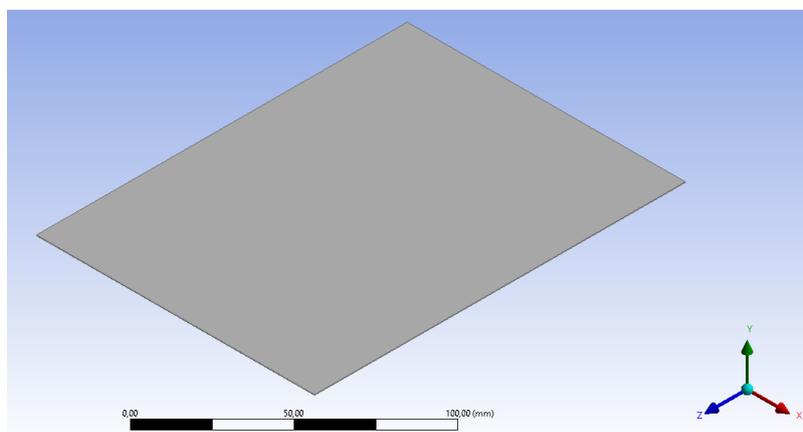
$$T^* = T_{yM}^{(1)} + \frac{R - \sigma^{(1)}}{\beta} \quad (4.17)$$

Para lidar com a assimetria tensão-compressão que pode ocorrer em ensaios experimentais é utilizado o parâmetro  $m$ , chamado de parâmetro de Lode. No nosso problema assumimos que o material é simétrico em tração-compressão, portanto  $m = 0$ .

## 5 METODOLOGIAS DE ESTUDO

Desde a definição da área de estudo do presente trabalho, houve a preocupação em torná-lo importante para o desenvolvimento de aplicações de elementos de Nitinol na engenharia. Nesse sentido, foi planejado o tipo de aparato a ser testado, a metodologia dos testes experimentais, a mensuração das deformações e a metodologia numérica.

Para as análises numéricas, foi utilizado um corpo de prova quadrado de 100 mm de altura, 100 mm de comprimento e 0,3 mm de espessura, representada na Figura 17.



**Figura 17 - Placa de Nitinol utilizada para análise na ferramenta ANSYS**

**Fonte: Autor**

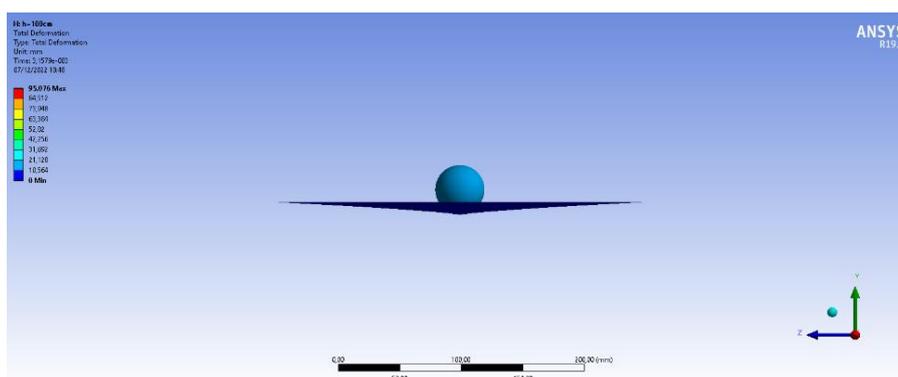
Com a finalidade de coletar resultados eficazes no âmbito das aplicações na engenharia e aproximar-se da natureza nas deformações reais, as análises iniciais foram focadas em uma metodologia dinâmica. Essa metodologia baseou-se no lançamento de esferas simulando impactos de lançamentos horizontais.

Posteriormente, iniciaram-se estudos estáticos, nas quais foram realizadas deformações quasi-estáticas por moça no corpo de prova, em diferentes profundidades, para, então, medir sua capacidade de recuperação mediante tratamento térmico. Os subcapítulos seguintes detalham o estudo de cada metodologia.

## 5.1 METODOLOGIA DINÂMICA: DEFORMAÇÃO POR LANÇAMENTO DE ESFERAS

Este modelo teve como premissa a utilização de esferas de diferentes tamanhos e massas para realizar um lançamento vertical sobre a placa. As esferas, por sua vez, foram lançadas através de um tubo, que foi utilizado como guia para que as esferas realizassem uma trajetória linear.

O estudo inicial se basearia na deformação em que cada esfera provocaria na placa, sob diferentes alturas. Após isso, mensurar-se-ia tal deformação para a obtenção da capacidade de recuperação da chapa após tratamentos térmicos. A Figura 18 abaixo representa esquematicamente o ensaio numérico e experimental deste modelo, extraída do ANSYS®.



**Figura 18 - Representação gráfica do contato da esfera com a chapa, gerando a deformação**

**Fonte: Autor**

Nesse contexto, optou-se por iniciar os estudos pela análise numérica. Tomou-se como base um ensaio experimental realizado por Monteiro et al (2016). Este ensaio utiliza um fio da liga Ni-Ti (54.4% Ni e 45.2% Ti) de diâmetro 1,71 mm e comprimento de 200 mm. Esses dados, por sua vez, foram importados para a ferramenta de análises do ANSYS®.

No ensaio, os autores enunciam que foram realizados dois testes: Digital Scanning Calorimetry (DSC) e o teste de tração. O primeiro trata-se de um ensaio objetivado a mensurar, de forma quantitativa e qualitativa, as mudanças

físicas de um corpo associadas às transições do material conforme a temperatura e tempo.

O DSC foi utilizado para se obter as temperaturas de transformação martensítica ( $M_s$  e  $M_f$ ) e austenítica ( $A_s$  e  $A_f$ ). Foram definidas, portanto as temperaturas  $M_s = 37.5^\circ\text{C}$ ,  $M_f = 26.2^\circ\text{C}$ ,  $A_s = 78.4^\circ\text{C}$  e  $A_f = 97.9^\circ\text{C}$ .

O segundo ensaio, por fim, foi utilizado para obter as propriedades mecânicas do fio analisado. Vale ressaltar que a análise no fio foi realizada com o objetivo de calibração e adequação da malha a ser utilizada nos análises subsequentes.

### 5.1.1 Calibração do Modelo Numérico

Com o objetivo de validar as propriedades do material Nitinol no softaew ANSYS, foi tomado como referência os dados obtidos experimentalmente por Monteiro et al (2016).

Com isso, foi possível realizar uma simulação computacional, a princípio com um fio de Nitinol para que, posteriormente, fosse possível utilizar os parâmetros corretos do material na análise com a chapa. Foram incluídos, portanto, os parâmetros exigidos pela ferramenta de simulação ANSYS, que estão dispostos na Tabela 3 abaixo

**Tabela 3 - Parâmetros de simulação ANSYS**

Constante	Parâmetro	Valor
C1	$h$	1 GPa
C2	$T_0$	20 °C
C3	$R$	120 MPa
C4	$\beta$	2 MPa $\times$ °C <sup>-1</sup>
C5	$\underline{\epsilon}_l$	0,057 mm <sup>-1</sup>
C6	$E_m$	23 GPa
C7	$m$	0

Fonte: Autor

Além dos parâmetros listados acima, admitiu-se os valores de módulo de Young ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), listados na Tabela 4.

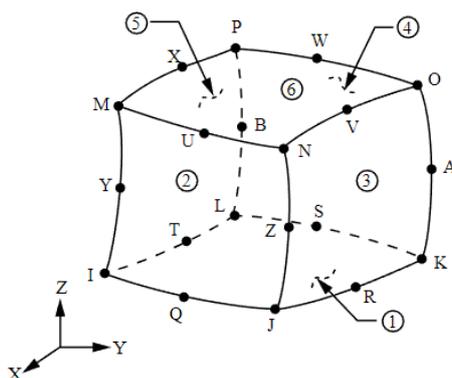
**Tabela 4 - Propriedades Elásticas da Austenita**

Parâmetro	Valor
$E$	54 GPa
$\nu$	0,3

Fonte: Autor

Para realizar a simulação numérica, foi necessário executar o software ANSYS™ Workbench 2022 R1 e performar o ensaio no sistema de análise estática estrutural. Para isso, foi necessário efetuar a discretização do modelo e, assim, utilizou-se o elemento SOLID186 na forma hexaédrica, no qual pode ser definido como um elemento do tipo 3D de ordem elevada e que apresenta um comportamento de deslocamento quadrático.

Este modelo possui 20 nós com três graus de liberdade em cada nó, o qual se distinguem nas translações axiais nos eixos X, Y e Z e estão identificadas pelas letras do alfabeto, conforme ilustradas na Figura 19.



**Figura 19 - Geometria elemento SOLID186**

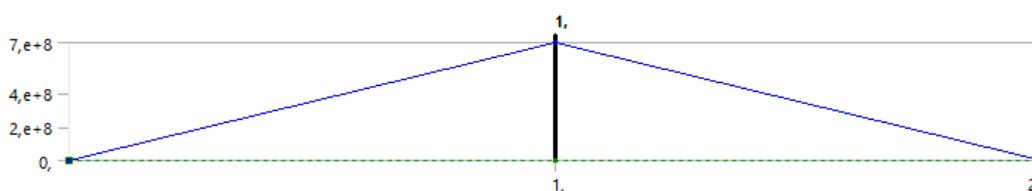
Fonte: ANSYS, 2021 [9]

### 5.1.2 Convergência de Malha

Para obter-se um processamento ótimo da simulação, é necessário analisar a quantidade de elementos a serem empregados no objeto de estudo e o tempo total de processamento da análise durante as simulações. Neste caso, o tempo requerido para uma completa simulação mostrou-se elevado, dependendo, assim, da quantidade de elementos constituídos na geometria.

Nesse contexto, foram realizadas as simulações em duas etapas: na etapa 1 foi realizado o carregamento de 700 MPa em uma das extremidades do fio, enquanto a outra extremidade permanecia fixada por um suporte, impedindo seu deslocamento nos três graus de liberdade e possíveis rotações. Vale ressaltar que o fio simulado tem as mesmas dimensões do teste experimental.

Na etapa 2 foi realizado o descarregamento total, retornando o fio ao seu estado inicial. O gráfico de força a partir das etapas está representada na Figura 20.



**Figura 20 - Gráfico Tensão x Etapa**

**Fonte: Autor**

Foram realizadas as seguintes simulações com diferentes tamanhos de malha, dispostas na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Resultados a partir do tamanho de malha

Tamanho da malha [mm]	Nós [un]	Elementos [un]	deformação máxima [%]	tempo de processamento [s]
0,3	11.889	24.827	7,695	6015
0,4	63.500	13.068	7,694	3142
0,5	36.144	6.970	7,694	1647
0,6	29.969	6.048	7,693	1412
0,7	12.845	2.384	7,695	553
0,8	8.113	1.305	7,696	318
0,9	5.168	672	7,699	152
1	5.168	672	7,699	146

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos da análise, foi confeccionado o gráfico da Figura 21 abaixo, com o objetivo de melhor definir o tamanho de malha a ser utilizado. Com isso, foi possível obter uma relação entre a melhor performance computacional e a precisão dos resultados.

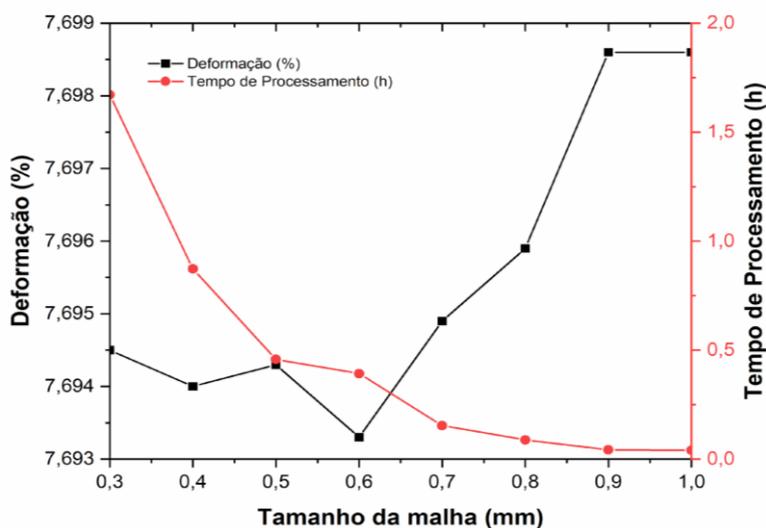


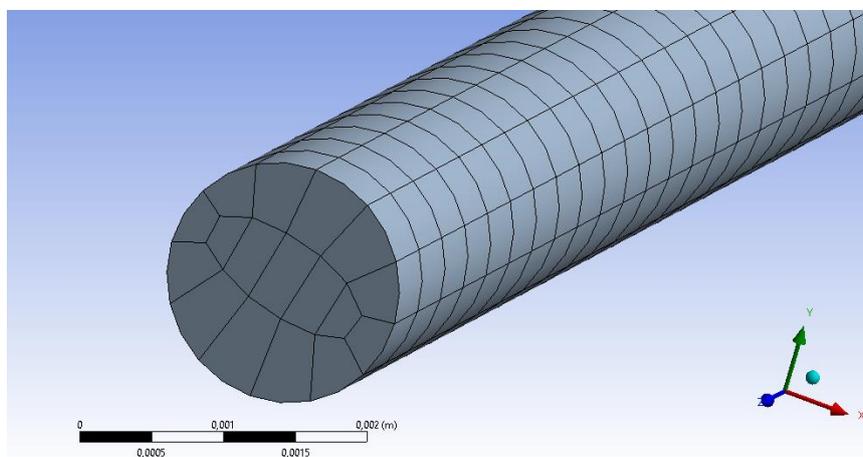
Figura 21 - Gráfico tamanho do elemento x Tempo de processamento

Fonte: Autor

A partir deste gráfico, observou-se que para o tamanho de elemento contido no intervalo entre 0,3 mm e 0,5 mm houve pouca alteração nos dados obtidos de deformação.

Em contrapartida, as malhas com elementos de tamanhos 0,3 mm e 0,4 mm obtiveram um tempo de processamento excessivamente alto. Tal fato caracterizou essas duas opções como pouco atraentes do ponto de vista de análise. Isso ocorre devido ao seu alto consumo computacional e retornando resultados semelhantes à malha com elemento de 0,5 mm, que, por sua vez obteve um tempo de processamento satisfatório.

Partindo de tal premissa, a malha escolhida para análise foi a com elementos de 0,5 mm, constituída de 6.970 elementos e 36.144 nós, sendo ilustrada na Figura 22 abaixo.



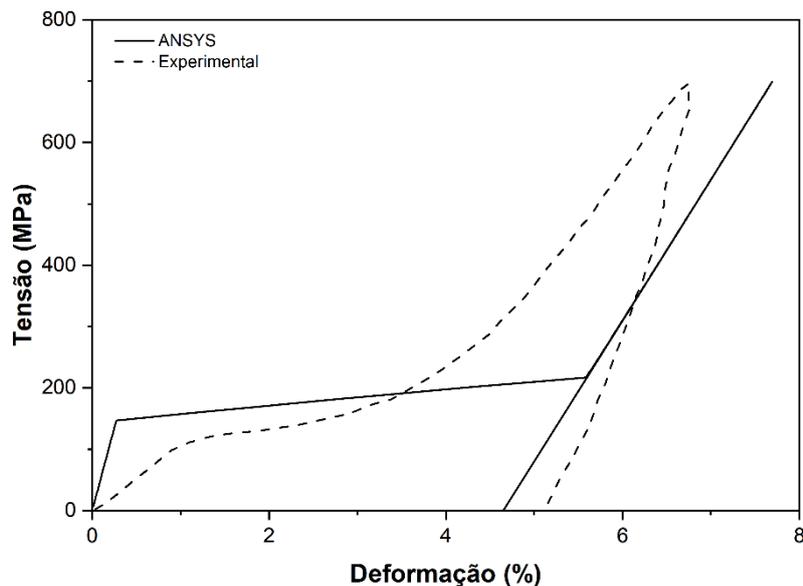
**Figura 22 - Malha da geometria**

**Fonte: Autor**

### 5.1.3 Validação Numérica

Como forma de validar os resultados das simulações obtidos através do ANSYS, comparou-se os resultados entre tensão e deformação, retornado pela análise de estrutura estática, com o ensaio experimental realizado por Monteiro et al (2016).

Para realizar tal validação, foi observado o comportamento de ambas as curvas características de SME, ilustradas na Figura 21, de forma a analisar se o resultado numérico representa adequadamente o resultado obtido experimentalmente no ensaio de tração.



**Figura 23 - Comparação gráfico numérico x experimental da curva tensão x deformação do fio de Nitinol**

**Fonte: Autor**

Após efetuadas as análises comparativas, concluiu-se que a curva obtida através da análise numérica corresponde de forma satisfatória os resultados obtidos experimentalmente por Monteiro et al (2016), conforme Figura 23 acima.

#### 5.1.4 Testes de Queda

Com o intuito de obter um resultado da tensão absorvida pela placa estudada após o impacto da esfera, utilizou-se da ferramenta LS-DYNA incorporada no Software de análise ANSYS Workbench 19.1.

A escolha desse módulo se deu por permitir a realização de simulações dinâmicas que se aproximam mais da realidade. Apesar do efeito de memória de forma ser quase-estático (independente do tempo), colisões em baixas velocidades podem ser consideradas como tal, com o objetivo de comparar os resultados dinâmicos com os estáticos optou-se por realizá-los das duas formas com um módulo dinâmico e outro estático.

Os testes de queda foram realizados com duas esferas de aço inoxidável, de 10 mm e 20 mm de diâmetro, respectivamente, com o objetivo de ampliar os resultados da análise, conforme exposto na Figura 24 e Figura 25, representadas a seguir. Estas figuras mostram a relação entre tensão absorvida pela placa para cada altura de queda de cada esfera.

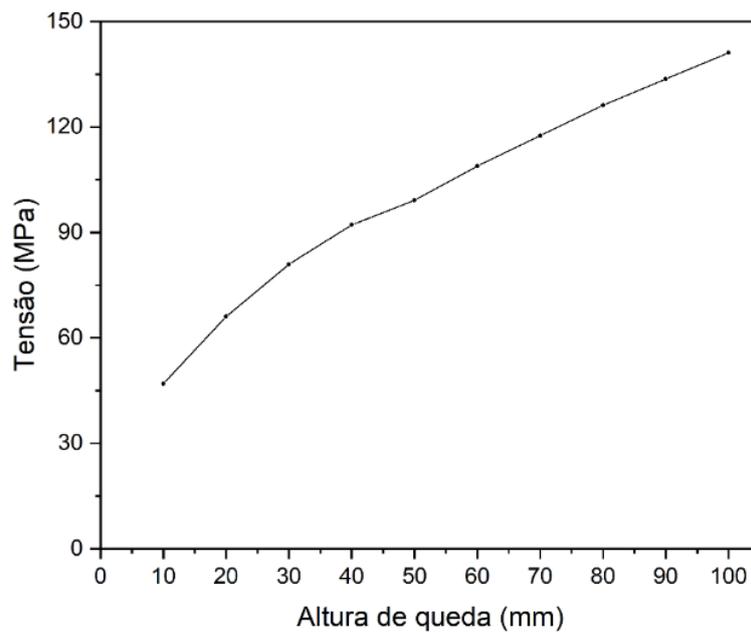
Cada esfera foi submetida a testes de queda livre em diferentes alturas, desde 10 cm a 100 cm e, assim, foram obtidas suas velocidades de impacto. Tais dados, estão dispostos na Tabela 6.

**Tabela 6 - Relação altura de queda e velocidade de impacto**

<b>Altura h (cm)</b>	<b>Velocidade de impacto v (m/s)</b>
10	1,40
20	1,98
30	2,43
40	2,80
50	3,13
60	3,43
70	3,71
80	3,96
90	4,20
100	4,43

**Fonte: Autor**

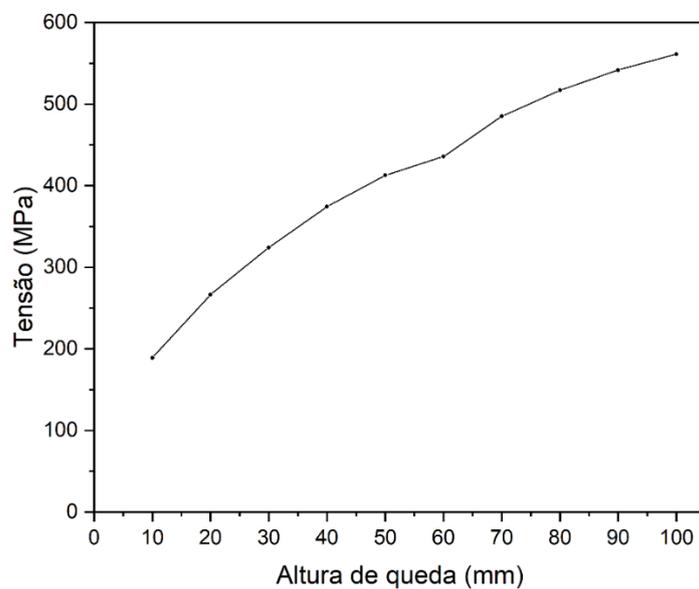
Foram extraídas, também, as informações de tensão máxima em MPa absorvida pela placa após as quedas das esferas nessas diferentes alturas. Na Figura 24 a seguir estão disponíveis as informações da tensão máxima em MPa para cada esfera de 10 mm em queda livre de cada altura.



**Figura 24 - Tensão Máxima em MPa absorvida pela placa de Nitinol para cada altura de queda livre da esfera de 10 mm**

**Fonte: Autor**

Na Figura 25 estão disponíveis as informações da tensão máxima em MPa para cada esfera de 20 mm em queda livre, referente à cada altura.



**Figura 25 - Tensão Máxima em MPa absorvida pela placa de Nitinol para cada altura de queda livre da esfera de 20 mm**

**Fonte: Autor**

Após obtidas as tensões máximas de cada queda livre produzida por cada esfera, foi utilizada a ferramenta de simulação por elementos finitos ANSYS® na placa de Nitinol para verificar seu comportamento quanto à deformação elástica.

#### 5.1.5 Análise dos Resultados

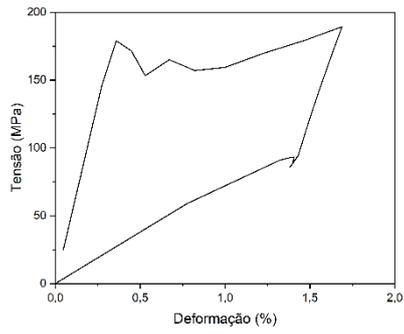
Com o objetivo de obter-se uma representação gráfica da Tensão x Deformação, foi realizada a análise na ferramenta de análise ANSYS, no módulo de Estrutura Estática.

Esta análise foi dividida em 3 etapas: carregamento e descarregamento da tensão aplicada, representando o impacto da queda livre das esferas de 10 mm e 20 mm de diâmetro com a placa de Nitinol e, a última etapa o tratamento térmico, aquecendo a placa de 22°C temperatura de 150°C.

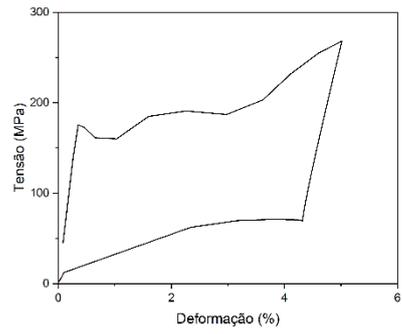
A carga foi aplicada no ponto central da placa, a fim de reduzir os efeitos de borda. Ademais, para representar as ferramentas de apoio, aplicou-se um suporte fixo nas 4 faces laterais da placa.

Após a análise numérica da simulação com a esfera de 10 mm de diâmetro, verificou-se que a tensão por ela transferida à placa, não foi suficiente para superar o comportamento elástico da liga. Portanto, esta análise não foi considerada no prosseguimento deste estudo.

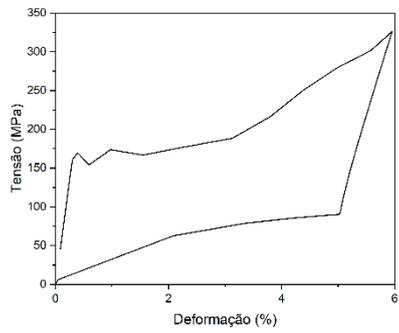
Os gráficos da Figura 26 abaixo representam o diagrama tensão-deformação, com a aplicação de tratamento térmico, para cada altura de queda referente à esfera de 20 mm de diâmetro.



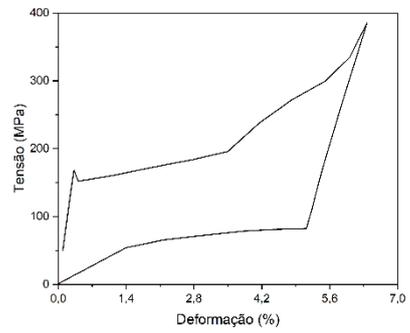
a – Altura de queda de 10 cm.



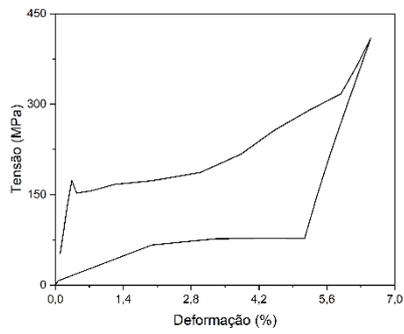
b – Altura de queda de 20 cm.



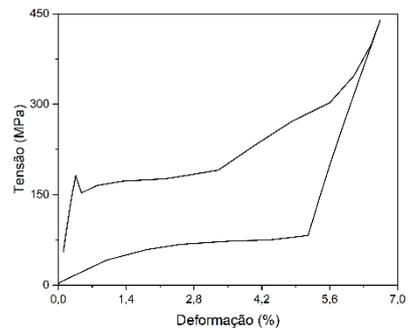
c - Altura de queda de 30 cm.



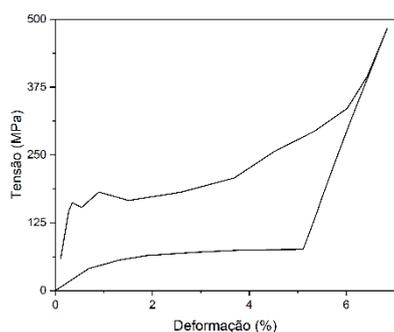
d - Altura de queda de 40 cm.



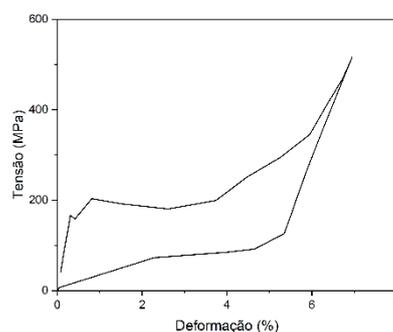
e - Altura de queda de 50 cm.



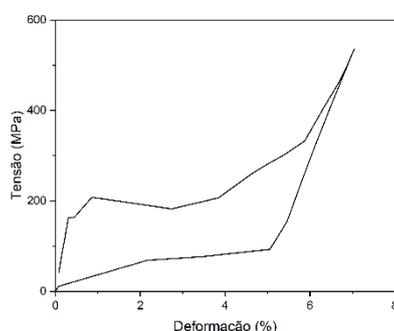
f - Altura de queda de 60 cm.



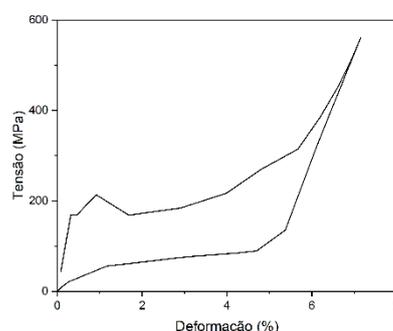
g - Altura de queda de 70 cm.



h - Altura de queda de 80 cm.



i - Altura de queda de 90 cm.



j - Altura de queda de 100 cm.

**Figura 26 - Diagrama tensão-deformação para cada altura de queda referente à esfera de 20 mm de diâmetro**

**Fonte: Autor.**

O passo seguinte deste método seria a realização do ensaio experimental com a esfera de 20 mm de diâmetro. Entretanto, apesar dos resultados apresentados nos gráficos acima terem sido bastante satisfatórios quando comparados a um modelo teórico, algumas dificuldades foram encontradas.

Tais dificuldades relacionam-se com a mensuração da deformação da placa no ensaio experimental. A princípio, estudou-se a possibilidade da utilização de um mapeamento superficial em três dimensões, através da linguagem Arduino.

Entretanto, não era viável a utilização desta ferramenta de medição neste estudo, tendo em vista sua indisponibilidade, e, ademais, seria necessário

ampliar o escopo de trabalho, e, devido a isso, será sugerido como um trabalho futuro.

Outro empecilho encontrado foi a falta de controle do deslocamento da esfera na queda livre. Tendo em vista o deslocamento vertical através do tubo e o aspecto transiente e dinâmico deste fenômeno, a esfera incidia mais de uma vez na placa quando lançada, fazendo com que houvesse deformações secundárias de difícil simulação. Sendo assim, não seria possível realizar uma comparação completa do modelo experimental com o modelo numérico apresentado.

Portanto, para prosseguir com o estudo, optou-se em desenvolver um modelo quase-estático, com maior controle dos parâmetros, para que o modelo computacional pudesse captar os mesmos dados do modelo experimental.

## 5.2 METODOLOGIA ESTÁTICA: DEFORMAÇÃO POR MOSSA

A fim de desenvolver um modelo experimental que refletisse as análises realizadas computacionalmente, optou-se por avaliar, através de uma moessa, as deformações plásticas na superfície da placa.

Esse modelo visa reproduzir a deformação causada no corpo de prova, oriunda de um carregamento pontual através de um indentador. Esta ferramenta possui a ponta semiesférica com diâmetro de 12 mm, conforme Figura 27.



**Figura 27 - Ferramenta indentadora**

**Fonte: Autor**

A moessa, por sua vez, é uma depressão proveniente da tensão gerada pelo contato entre dois corpos, caracterizada pelo deslocamento de material, em direção paralela ao sentido do carregamento, para dentro ou fora da superfície do material.

Partindo dessa primícia, é possível desenvolver um ensaio com maior controle sobre o processo de carregamento e descarregamento, visto que os testes de queda com as esferas apresentaram problemas que comprometeram a viabilidade do estudo neste método.

Portanto, as deformações por moessa no corpo de prova são mensuráveis experimentalmente tendo em vista a melhor precisão das variáveis de processo. Ademais, elimina-se a possibilidade de deformações secundárias e tensões residuais provenientes de carregamentos sucessivos, como aconteceu com as esferas que quicavam até que o sistema entrasse em equilíbrio.

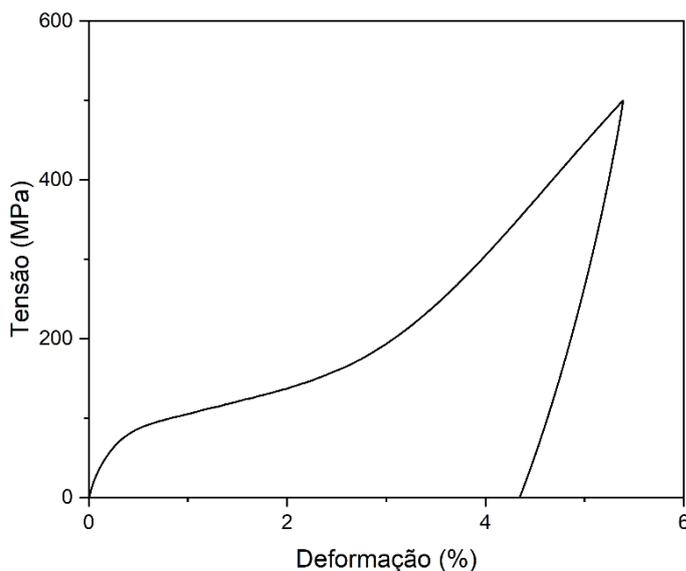
### 5.2.1 Calibração do Modelo Experimental

Para o início da análise, foram realizados dois testes de tração e utilizou-se uma chapa como corpo de prova para a calibração do modelo experimental. As dimensões da chapa foram 10 mm de largura e 70 mm de comprimento e 0,3 mm de espessura, e a placa foi fixada a 10 mm de distância em cada ponta. Os ensaios, portanto, foram realizados na sessão livre de 10 mm de largura e 50 mm de comprimento.

O primeiro teste foi realizado até uma tensão de  $\sigma = 500 \text{ MPa}$ . O segundo teste foi realizado até a tensão de ruptura do corpo de prova, com o objetivo de definir seu perfil de plasticidade.

O gráfico da Figura 28 representa a deformação resultante da tensão aplicada com os parâmetros do primeiro ensaio, ou seja, com o carregamento até  $\sigma = 500 \text{ MPa}$ , e, subsequentemente, o descarregamento.

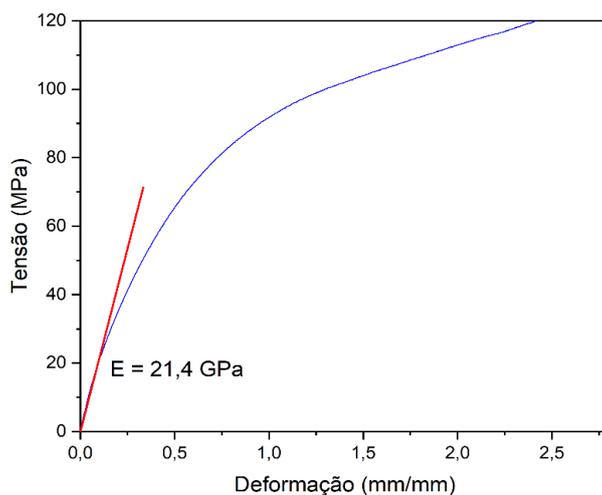
Carregando o material até esta tensão, pôde-se verificar uma deformação de aproximadamente 5% e, ao fim do descarregamento, esta deformação retornou à aproximadamente 4%. A deflexão da curva representa a mudança estrutural por tensão da austenita para martensita.



**Figura 28 - Ciclo de carregamento e descarregamento, relacionando tensão e deformação.**

**Fonte: Autor**

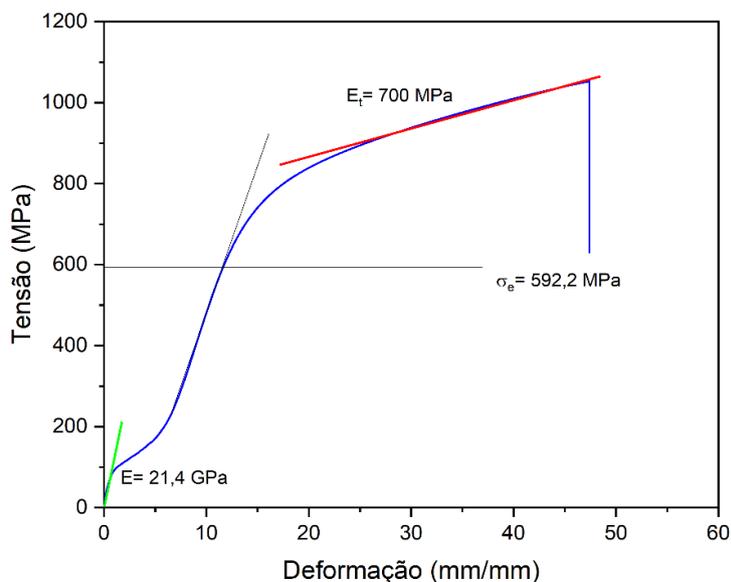
A partir do gráfico da Figura 29 obteve-se a reta da curva de elasticidade com o objetivo de mensurar a tensão de escoamento da liga por meios geométricos da própria curva. Numericamente, este ponto pode ser representado por  $E = 21,4 \text{ GPa}$ . Esta reta é representada na cor verde no gráfico da Figura 50.



**Figura 29 - Curva de elasticidade**

**Fonte: Autor**

A Figura 30 abaixo representa o segundo ensaio, na qual foi realizado até a tensão de ruptura do material, este, por sua vez, representa toda a trajetória de deformação da chapa metálica, de acordo com a tensão aplicada. Este gráfico relaciona a tensão e a deformação, obtendo-se a tensão de escoamento e o módulo elástico e tangente da liga.



**Figura 30 - Tensão de escoamento e o módulo elástico da liga**

**Fonte: Autor**

No ponto inicial do gráfico, tem-se a fase martensítica, conforme o carregamento é aplicado, pode-se obter, através da reta verde, o módulo elástico da fase martensítica, que representa a deformação elástica. A reta cinza possui a mesma inclinação da reta verde e representa a deformação elástica após a reorientação da martensita.

Entre estas retas, ocorre, de fato, a reorientação da fase martensítica do corpo de prova induzida por tensão, ou seja, da fase martensítica maclada para a fase martensítica não maclada.

Com a indução do carregamento mecânico, há a reordenação da estrutura cristalina do corpo de prova, caracterizando a demaclação da estrutura martensítica. O limite de escoamento da placa, portanto, foi mensurado em  $\sigma_e = 592,2 \text{ MPa}$ .

A reta vermelha representa o módulo tangente na região plástica do material, que pode ser associado ao módulo plástico em um modelo de plasticidade bilinear e a tensão última  $\sigma_{ruptura} = 1050 MP$ . O módulo tangente foi definido em  $E_t = 0,7 GP$ .

A partir dessas informações, serão utilizados estes mesmos parâmetros para realizar a simulação no software ANSYS® para configurar a calibração do modelo numérico.

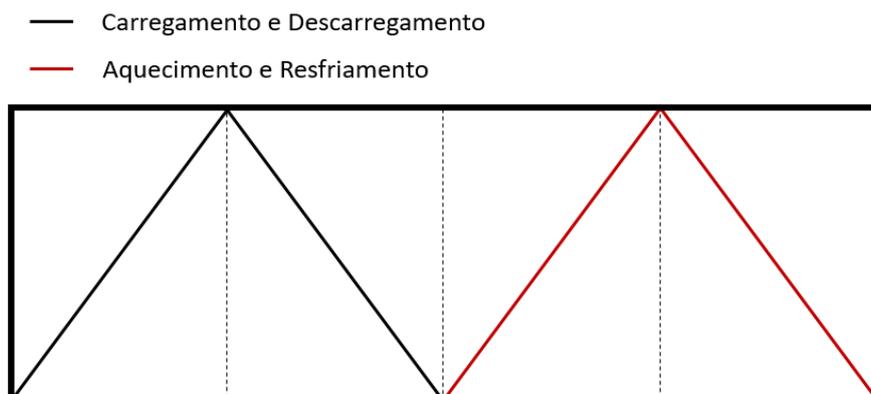
### 5.2.2 Testes Numéricos de Carga e Deslocamento

Os estudos numéricos também foram realizados através do software ANSYS® para esta metodologia. Para tanto, as análises estruturais da placa foram simuladas em profundidades de 2 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm e a deformação foi provocada pela ferramenta indentadora.

Foram analisados, portanto, as interações entre carregamento e deslocamento, carregamento e tempo, deslocamento e tempo, proporção de martensita e austenita na liga por tempo, e, por fim, os gráficos tridimensionais relacionando carregamento, deslocamento e temperatura para cada profundidade descrita.

Outra condição de contorno utilizada como parâmetro neste estudo foram as temperaturas de tratamento térmico. Os ciclos de aquecimento e resfriamento variaram entre uma temperatura ambiente mínima estimada em 22°C e um valor máximo de 100°C.

A Figura 31 abaixo representa as etapas da simulação. Iniciou-se com o carregamento, ou seja, o contato entre a ferramenta e a chapa, e o descarregamento. Após isso, realizou-se o tratamento térmico à 100°C e, por fim, o resfriamento até a temperatura ambiente.



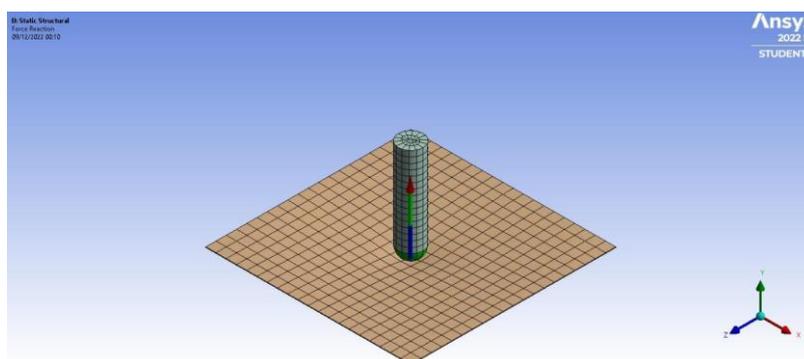
**Figura 31 - Etapas da simulação de deformação por mocha**

Fonte: Autor

### 5.2.2.1 Validação numérica

O atual subcapítulo tem por objetivo descrever a realização dos testes de carga e o consequente deslocamento observado na chapa de Nitinol.

A Figura 32 abaixo, extraída do ANSYS®, demonstra a realização dos testes tanto no modelo experimental quanto no modelo numérico, ilustrando a ferramenta indentadora e a chapa utilizada nos ensaios.

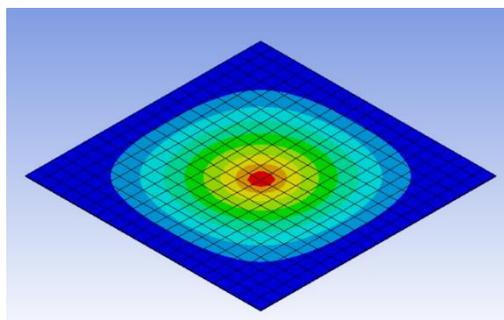


**Figura 32 - Representação gráfica do teste por mocha**

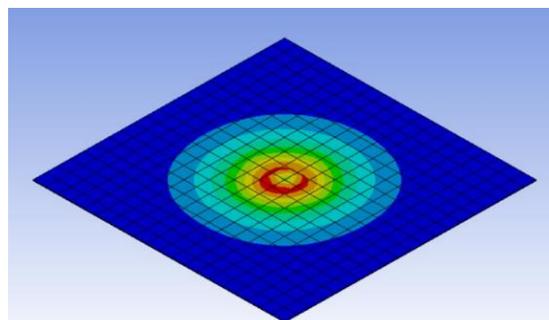
Fonte: Autor

As representações gráficas da Figura 33 demonstram o comportamento da placa de acordo com o contato com a ferramenta onde o deslocamento é máximo, ou seja, em 2 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm. É notória a separação por

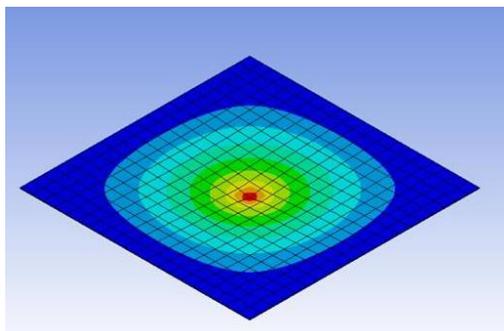
regiões, na qual a região vermelha é a mais crítica quanto à deformação e as regiões em verde e azul com menor criticidade.



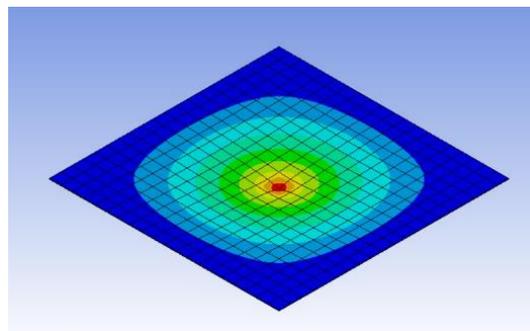
a - Deslocamento máximo de 2 mm.



b - Deslocamento máximo de 3 mm.



c - Deslocamento máximo de 4 mm.

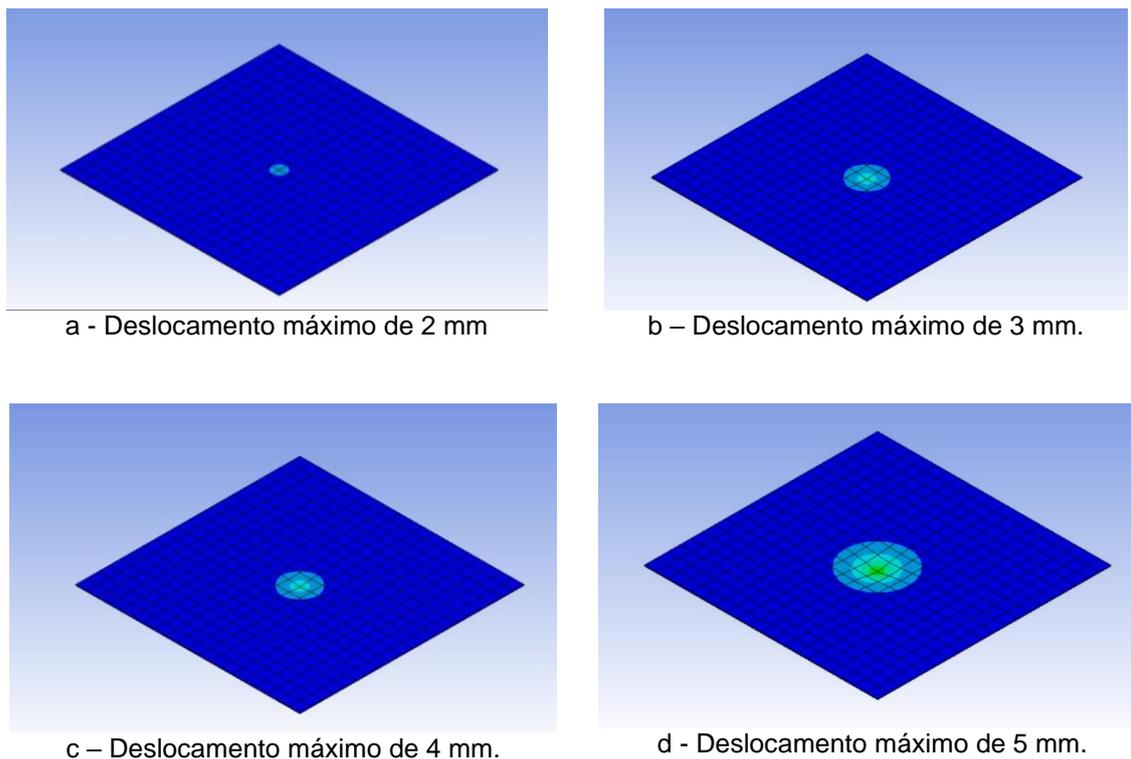


d - Deslocamento máximo de 5 mm.

**Figura 33 - Representação das zonas críticas da placa de acordo com o contato com a ferramenta para os deslocamentos máximos.**

**Fonte: Autor**

Além disso, também foram extraídas as fotografias referentes ao deslocamento residual da placa após o descarregamento total antes do tratamento térmico. Estas representações estão dispostas na Figura 34 abaixo.

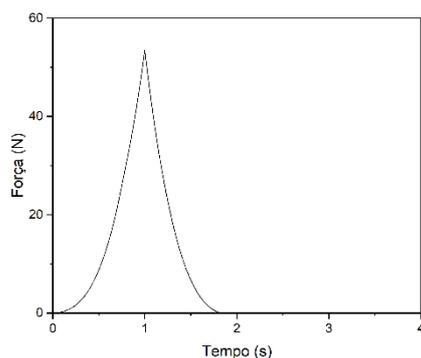


**Figura 34 - Representação das deformações plásticas residuais da placa de acordo com o contato com a ferramenta para os deslocamentos máximos.**

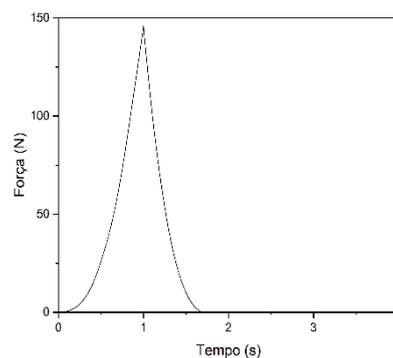
**Fonte: Autor**

Observou-se através desta análise um comportamento previsto de que à medida que o deslocamento sobre a placa reduz, espera-se que o deslocamento residual também seja menor.

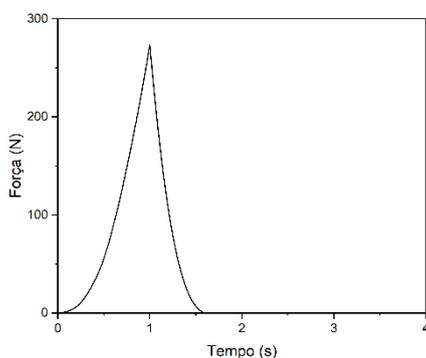
Os gráficos da Figura 35 representam a evolução da carga aplicada à ferramenta com o tempo para os deslocamentos máximos impostos.



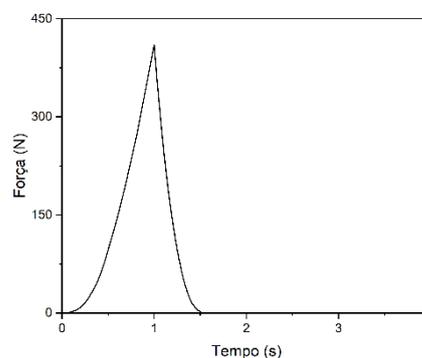
a - Deslocamento máximo de 2 mm.



b- Deslocamento máximo de 3 mm.



c - Deslocamento máximo de 4 mm.



d - Deslocamento máximo de 5 mm.

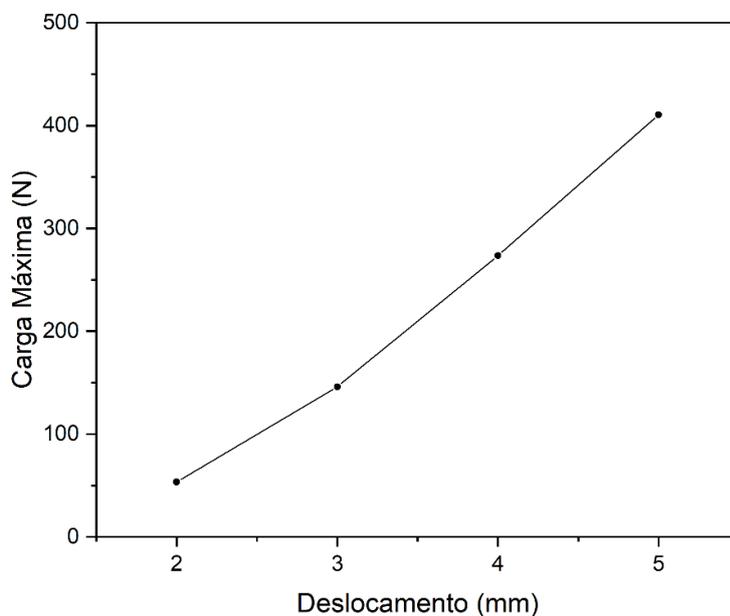
**Figura 35 - Representação da evolução da carga aplicada à ferramenta com o tempo para cada deslocamento máximo**

**Fonte: Autor.**

Além disso, ainda na Figura 35, pode-se analisar que para  $t = 1$  s tem-se o deslocamento máximo. Os instantes entre  $t = 1$  s e  $t = 2$  s mostram o retorno da ferramenta de contato, ou seja, o descarregamento. Neste momento, a extensão da mossa também diminui e atinge o ponto mínimo, restando o deslocamento residual como observado na Figura 34.

A partir dos gráficos acima, verificou-se o carregamento máximo da ferramenta sobre a placa para cada simulação obtido através do ANSYS®. O carregamento máximo para o deslocamento de 5 mm foi igual a 410,6 N, para 4

mm igual a 273,5 N, para 3 mm igual a 146 N e para 2 mm igual a 53,5 N, de acordo com a Figura 36 abaixo.



**Figura 36 - Carregamento máximo por deslocamento**

**Fonte: Autor.**

A partir dos resultados obtidos no software, é possível determinar o valor deste deslocamento residual, utilizando o valor do deslocamento quando o carregamento atinge 0 N. Estes resultados estão expostos na Tabela 7 abaixo.

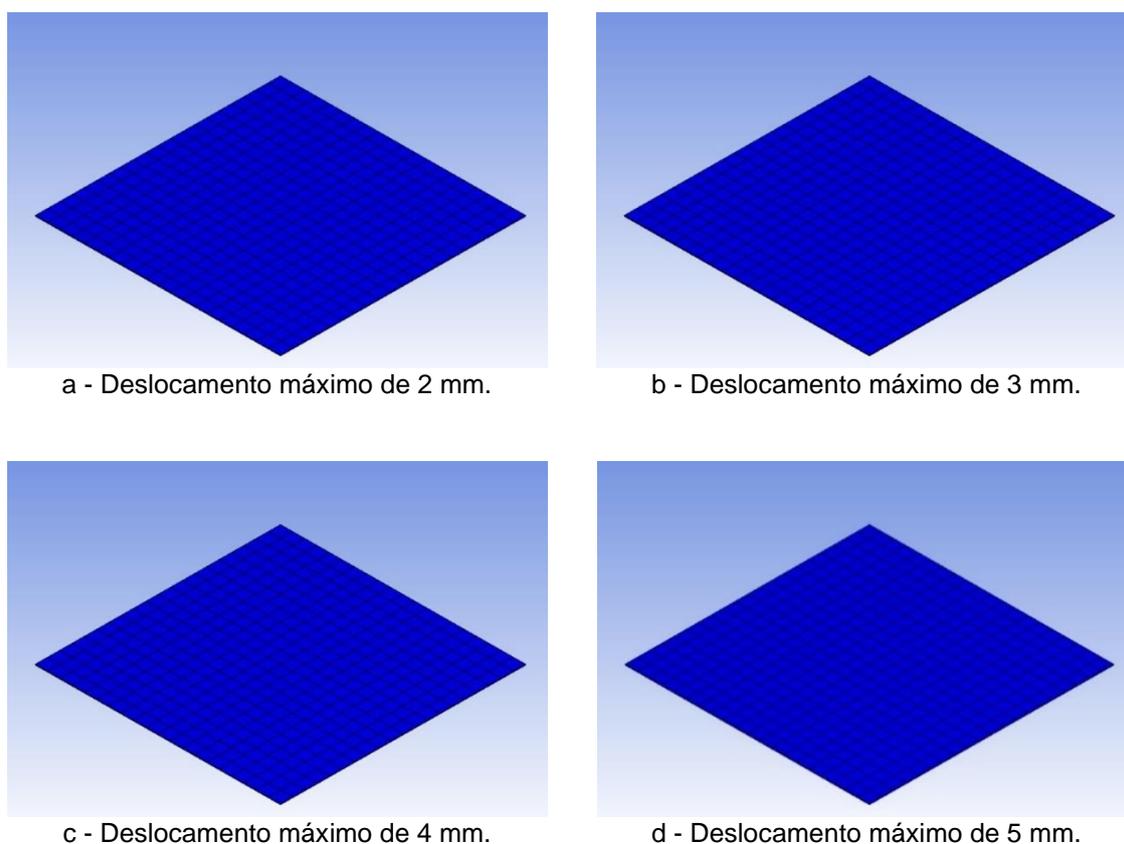
**Tabela 7 - Deslocamento residual relacionado a cada deslocamento máximo**

<b>Simulação</b>	<b>Deslocamento residual (mm)</b>
5 mm	2,53
4 mm	1,7
3 mm	0,89
2 mm	0,25

**Fonte: Autor**

Entre  $t = 2$  s e  $t = 3$  s, também da Figura 31, marca-se os instantes em que é realizado tratamento térmico de aquecimento da placa de  $22^{\circ}\text{C}$  até no máximo a  $100^{\circ}\text{C}$ .

Após o tratamento térmico realizado, observou-se que a placa recuperou sua deformação em totalidade, conforme mostrado nas representações gráficas da Figura 37 abaixo.



**Figura 37 - Estado final da chapa após tratamento térmico para cada deslocamento máximo**

**Fonte: Autor.**

Conforme verificado nos resultados obtidos no software, a placa recuperou-se em totalidade antes de atingir a temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ . Este dado

foi obtido utilizando o valor da temperatura quando o deslocamento atingiu 0 mm. Os valores estão representados na Tabela 8 abaixo.

**Tabela 8 - Temperatura na qual há o alívio total das deformações residuais para cada deslocamento máximo**

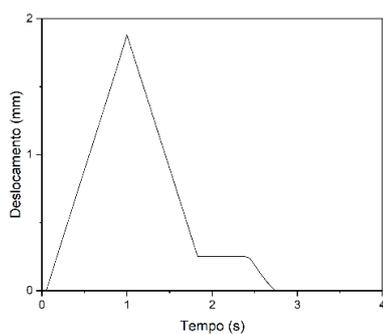
Simulação	Temperatura (°c)
5 mm	80,5
4 mm	80,5
3 mm	80,5
2 mm	80,5

Fonte: Autor

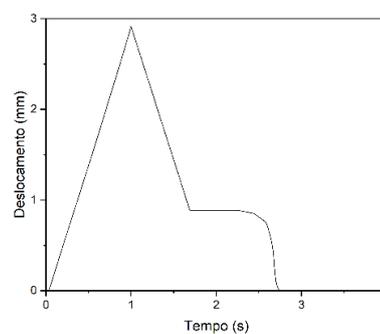
Os instantes entre  $t = 3$  s e  $t = 4$  s, por fim, foram caracterizados pelo resfriamento, na qual a faixa de temperatura foi de  $100^{\circ}\text{C}$  até  $22^{\circ}\text{C}$ .

No entanto, verificou-se que esta etapa de resfriamento não influenciou nos parâmetros da simulação.

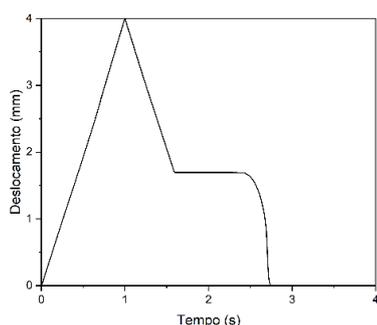
Os gráficos da Figura 38 abaixo referenciam o comportamento do deslocamento com o tempo.



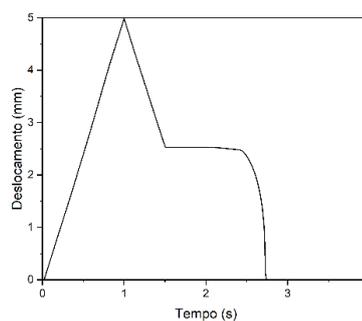
a - Deslocamento máximo de 2 mm.



b - Deslocamento máximo de 3 mm.



c - Deslocamento máximo de 4 mm.

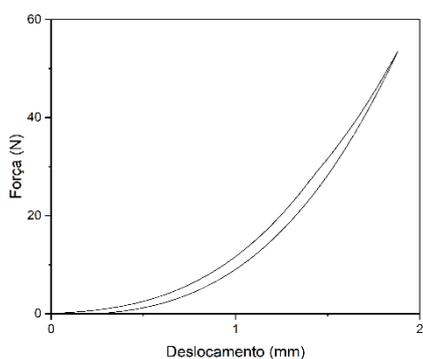


d - Deslocamento máximo de 5 mm.

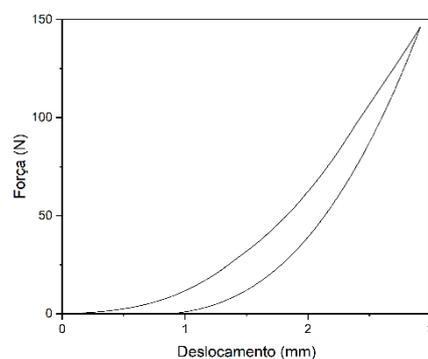
**Figura 38 - Representação do comportamento do deslocamento em relação ao tempo para cada deslocamento máximo**

**Fonte: Autor**

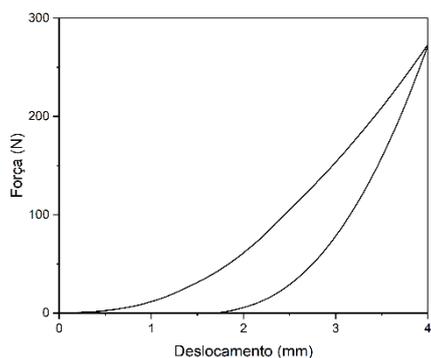
Conforme mencionado anteriormente e confirmado através dos gráficos acima, após o descarregamento da ferramenta, há permanência de um deslocamento residual que posteriormente é recuperado através do tratamento térmico, ou seja, a partir de  $t = 2$  s. Os gráficos da Figura 39 abaixo ilustram a relação entre tensão aplicada à placa e deslocamento resultante.



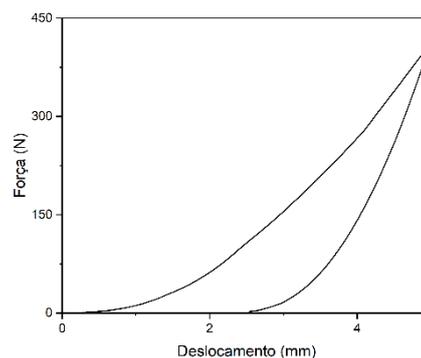
a - Deslocamento máximo de 2 mm.



b - Deslocamento máximo de 3 mm.



c - Deslocamento máximo de 3 mm.



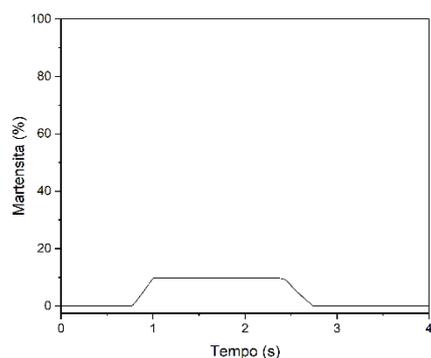
d - Deslocamento máximo de 5 mm.

**Figura 39 - Tensão aplicada à placa e deslocamento resultante para cada deslocamento máximo**

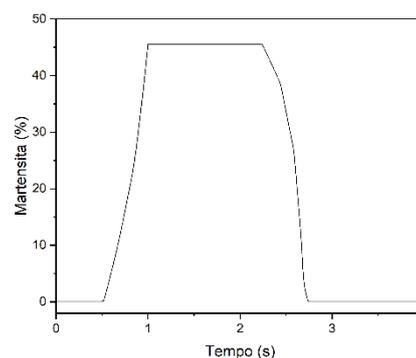
**Fonte: Autor**

A partir destes gráficos, pode-se observar que conforme aumenta-se o deslocamento sobre a placa, amplia-se a área entre a curva de carregamento e descarregamento. Tal fato demonstra a redução do deslocamento residual.

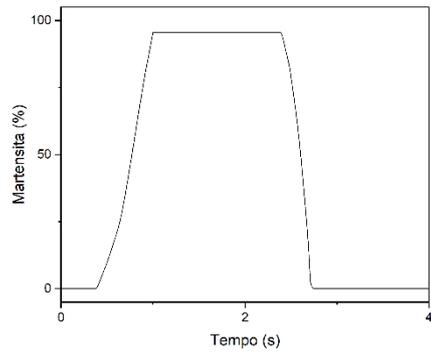
Os gráficos da Figura 40 abaixo representam a proporção de martensita em relação ao tempo para cada deslocamento máximo na placa.



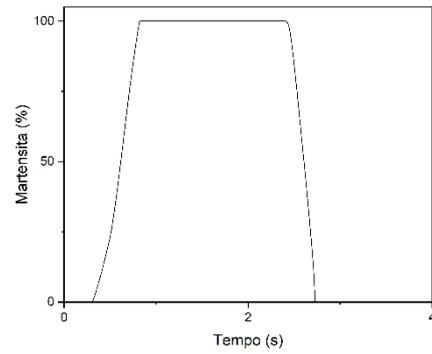
a - Deslocamento máximo de 2 mm.



b - Deslocamento máximo de 3 mm.



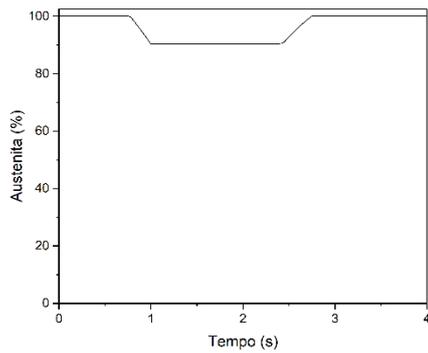
c - Deslocamento máximo de 4 mm.



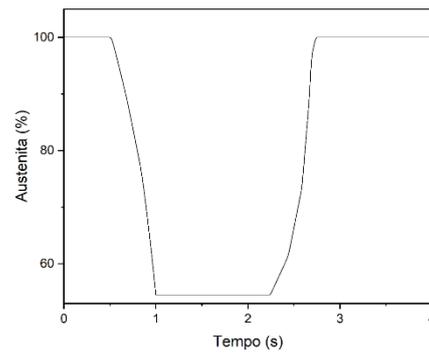
d - Deslocamento máximo de 5 mm.

**Figura 40 - Proporção de martensita em relação ao tempo para cada deslocamento máximo**

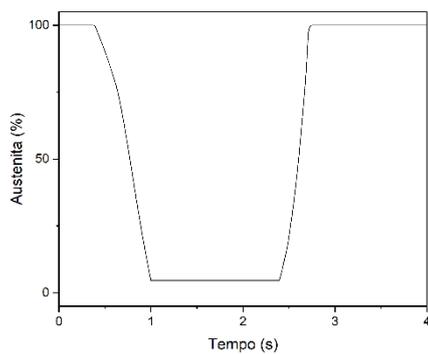
**Fonte: Autor**



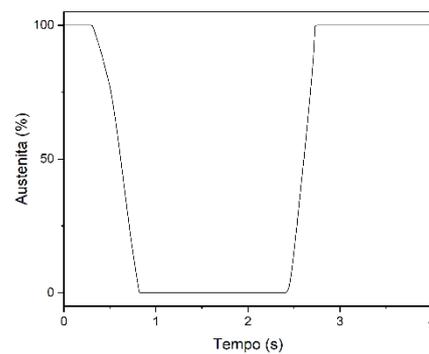
a - Deslocamento máximo de 2 mm.



b - Deslocamento máximo de 3 mm.



c - Deslocamento máximo de 4 mm.



d - Deslocamento máximo de 5 mm.

**Figura 41 - Proporção de austenita em relação ao tempo para cada deslocamento máximo**

**Fonte: Autor.**

Os gráficos da Figura 41 acima, por sua vez, representam a proporção de austenita em relação ao tempo para cada deslocamento máximo na placa.

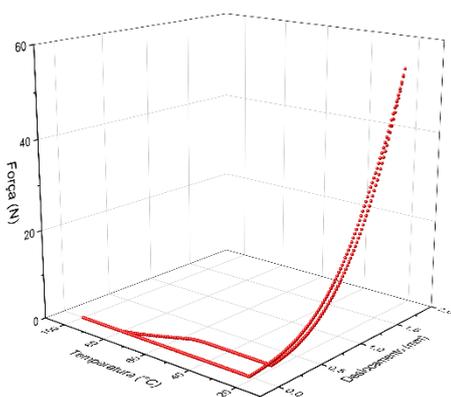
A partir dos gráficos da Figura 40 sobre a proporção martensítica da chapa, observou-se que somente a simulação com deslocamento de 5 mm atingiu carregamento necessário para transformar em totalidade a estrutura da placa em martensita. Os resultados da proporção martensítica, portanto, estão dispostos na Tabela 9 abaixo.

**Tabela 9 - Proporção martensítica para cada deslocamento máximo**

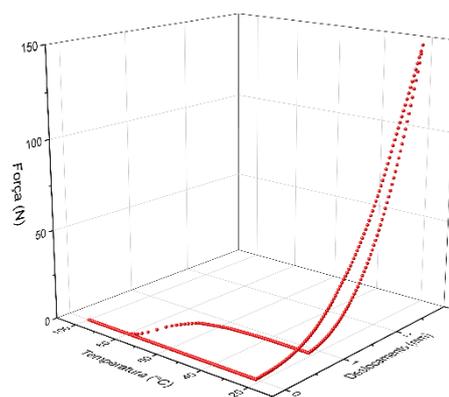
Simulação	Martensita
5 mm	100 %
4 mm	95 %
3 mm	45 %
2 mm	10 %

Fonte: Autor

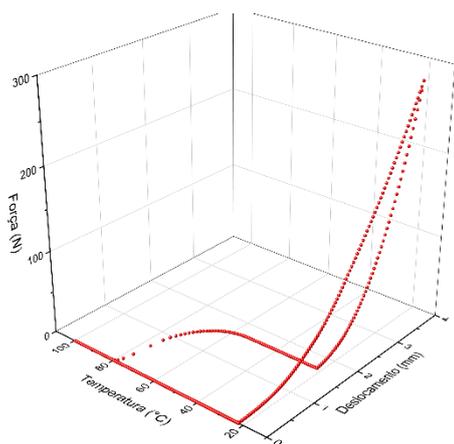
Os gráficos da Figura 42 abaixo mostram, portanto, a relação conjunta do comportamento da placa quanto à temperatura, deslocamento e carregamento nas simulações realizadas.



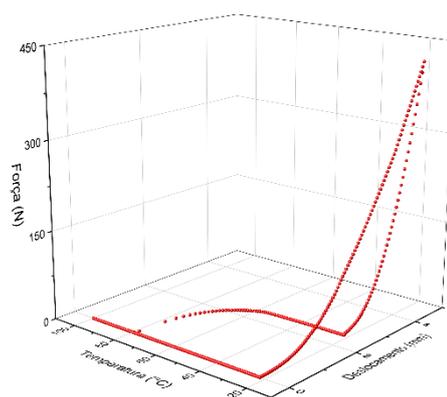
a - Deslocamento máximo de 2 mm.



b - Deslocamento máximo de 3 mm.



c - Deslocamento máximo de 4 mm.



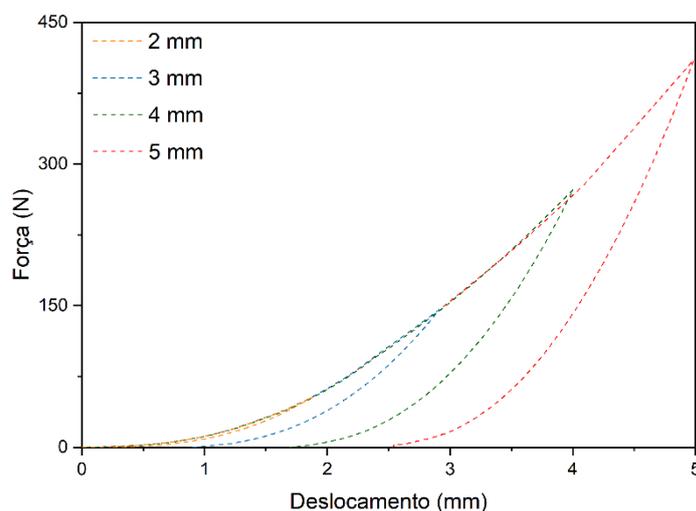
d - Deslocamento máximo de 5 mm.

**Figura 42 - Representação do comportamento da placa quanto à temperatura, deslocamento e carregamento para cada simulação**

Fonte: Autor.

A partir destes dados, é possível avaliar o comportamento termomecânico de forma ampla relacionando as principais grandezas do estudo.

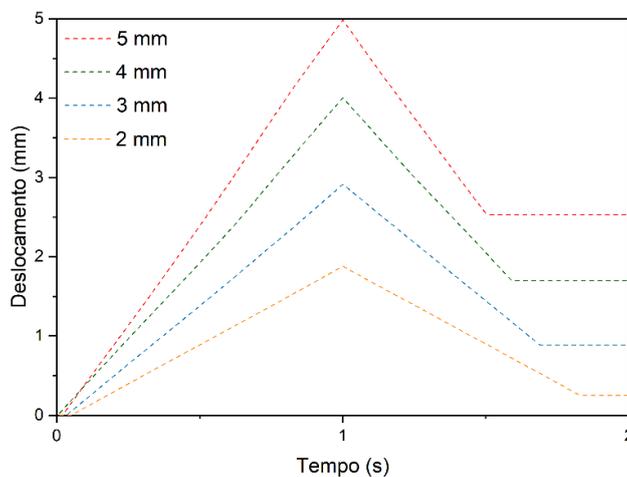
Como uma comparação dos resultados numéricos obtidos, obteve-se os gráficos das Figuras 43, 44 e 45 abaixo.



**Figura 43 - Comparação dos resultados numéricos para cada simulação relacionando força e deslocamento**

Fonte: Autor

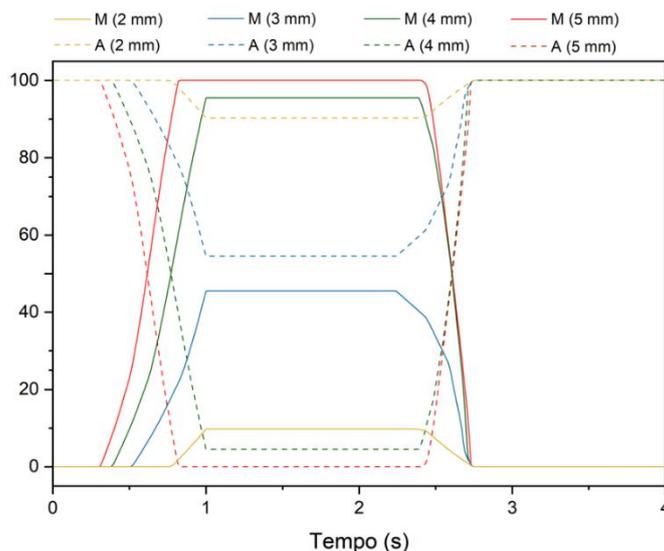
A figura 43 relaciona a força exercida sobre a placa e o deslocamento da ferramenta e demonstra que, para maiores deslocamentos, é necessário submeter a chapa a carregamentos mais elevados.



**Figura 44 - Comparação dos resultados numéricos para cada simulação relacionando deslocamento e tempo**

**Fonte: Autor**

Acima, a figura 44 ilustra a relação entre tempo e deslocamento, que demonstra que, para um mesmo intervalo de tempo, o deslocamento pode variar se houver mudança em outros parâmetros, como a velocidade da ferramenta e, conseqüentemente, o carregamento submetido.



**Figura 45 - Comparação das proporções de austenita e martensita para cada simulação em relação ao tempo**

**Fonte: Autor**

Levando em consideração as Figuras 43 e 44, a Figura 45 reflete a proporção de martensita e austenita para cada deslocamento. Como mencionado neste estudo, o EMF se dá através da reorganização da martensita quando submetida a um carregamento. Nota-se que a proporção martensítica é diretamente proporcional ao deslocamento, visto que as maiores taxas de reorganização microestrutural são relacionadas ao maior deslocamento da ferramenta na placa.

#### 5.2.2.2 Análise dos resultados numéricos

As análises numéricas demonstram que, para a recuperação total das deformações sofridas pela placa, considerando o carregamento máximo de 410 N, a temperatura de aquecimento de 100 °C é suficiente para que haja a total recuperação das tensões.

Percebe-se que ao atingir a temperatura de 80,5 °C toda deformação da peça é eliminada, ou seja, quando o tratamento térmico é realizado até a temperatura máxima de 100 °C, tem-se um controle maior sobre as variáveis do

experimento e, conseqüentemente, uma análise com parâmetros mais conservadores.

Ademais, nota-se que a etapa de resfriamento não impactou o estudo no âmbito de recuperação da placa.

Conforme observado na Figura 45, existe a não totalidade da reorientação da martensita maclada para martensita demaclada, concluindo-se que nas demais simulações com deslocamento da ferramenta inferior ou igual à 4 mm, o efeito de memória de forma é reduzido. No entanto, o fato de a reorientação não ter sido completa não afeta o resultado final, tendo em vista que a recuperação foi completa.

### 5.2.3 Testes Experimentais de Carga e Deslocamento

Na etapa experimental, foram realizados seis ensaios diferentes, variando o carregamento aplicado e o diâmetro do indentador. Nestes ensaios, foi utilizado um soprador térmico para tratar termicamente a chapa e, conseqüentemente, recuperar a deformação sofrida através do EMF.

Os dados experimentais de cada ensaio foram mapeados computacionalmente e comparados com as estimativas realizadas no software ANSYS® para os parâmetros utilizados.

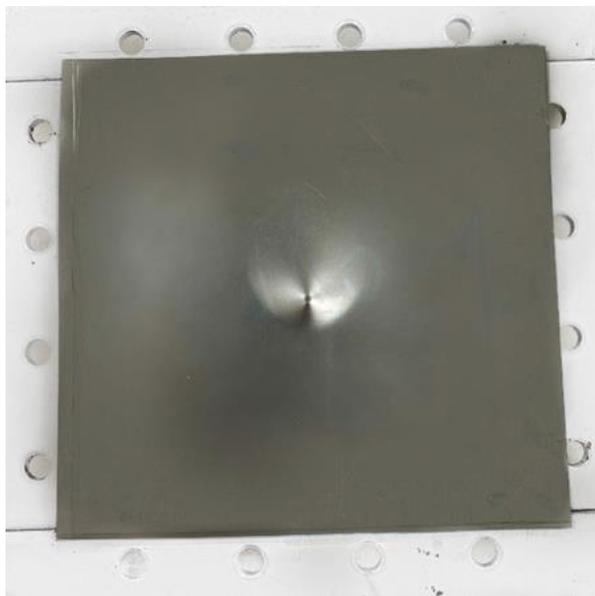
O primeiro teste foi realizado utilizando um indentador com diâmetro de 6 mm para aplicação do carregamento e uma velocidade de 2 mm/s de avanço da ferramenta, este parâmetro foi fixado para todos os ensaios subsequentes.

#### 5.2.3.1 Validação experimental

Tendo em vista a descrição acima, este subcapítulo tem por objetivo descrever a realização dos testes experimentais.

No primeiro ensaio, o indentador de 6 mm de diâmetro de ponta entrou em contato com a placa, aumentando o carregamento à medida que adentrava a chapa, até que a massa aplicada fosse aproximadamente 45 Kg, quando optou-se por interromper o teste devido à alta tensão no ponto de contato.

A Figura 46 abaixo mostra a deformação na placa após a aplicação de tensão.

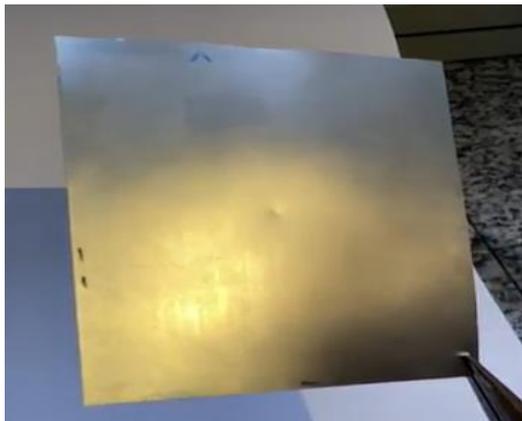


**Figura 46 - Deformação sofrida pela placa após o primeiro ensaio experimental**

Fonte: Autor

Entretanto, após a aplicação de tratamento térmico para recuperação da deformação, pôde-se perceber a formação de uma pequena deformação plástica no ponto de contato entre a o corpo e o indentador.

Esta deformação plástica, mostrada na Figura 47, ocorreu devido ao alto valor do carregamento associado à um pequeno diâmetro de ferramenta. Portanto, adotou-se a medida de mudar o diâmetro do indentador de 6mm para 12 mm para o ensaio seguinte e a interrupção do teste quando a massa do carregamento fosse equivalente à 25 Kg.

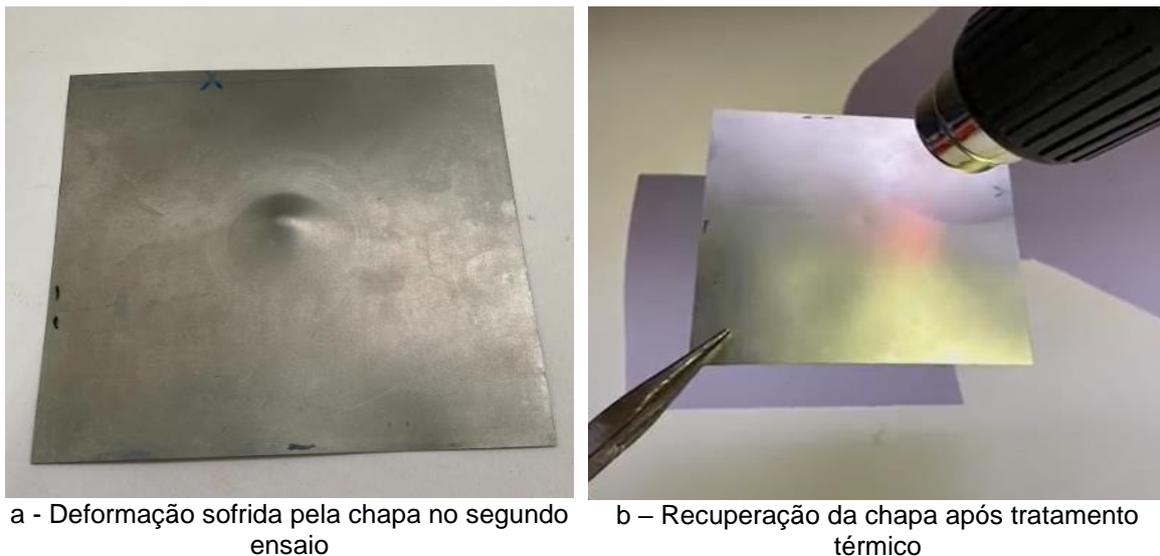


**Figura 47 – Plasticidade pontual na chapa provocada no primeiro ensaio**

**Fonte: Autor**

No segundo ensaio, manteve-se a velocidade de avanço da ferramenta do teste anterior e utilizou-se a ferramenta de diâmetro maior. Como resultado, houve a formação de uma mocha, menos profunda que a primeira, entretanto, sem deformação plástica em sua superfície.

Conseqüentemente, a chapa recuperou-se por completo da deformação sofrida após o tratamento térmico, indicando que a massa de 25 Kg era relativamente baixa e, por conta dos resultados obtidos no segundo ensaio, utilizou-se o diâmetro de 12 mm para o indentador em todos os testes subsequentes. A deformação da chapa e sua recuperação após o tratamento térmico estão dispostas na Figura 48.

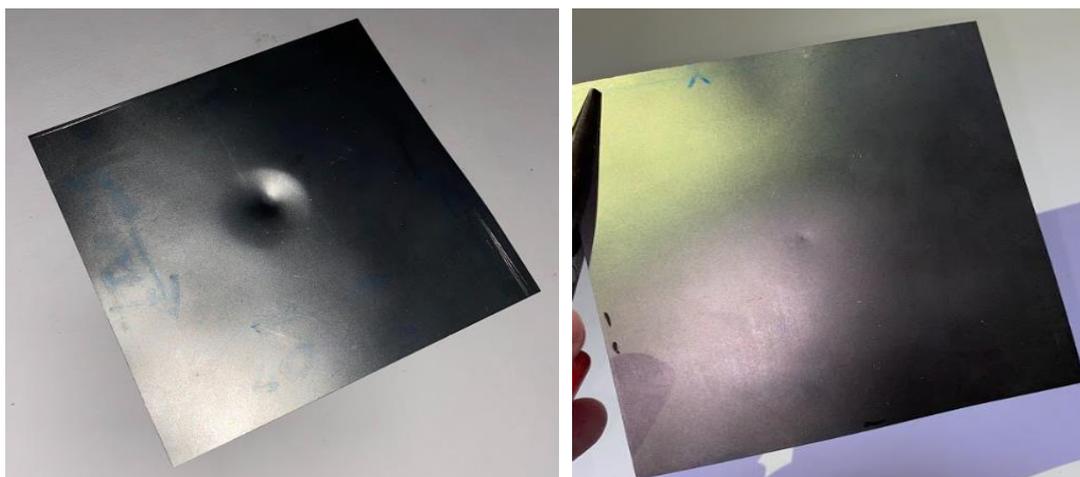


**Figura 48 - Deformação e recuperação da chapa no segundo ensaio**

**Fonte: Autor**

Para o terceiro teste, foram utilizados os mesmos parâmetros do ensaio anterior, alterando apenas o valor da massa do carregamento de 25 Kg para 30 Kg. Nestas condições, também houve a formação da moessa, assim como a recuperação rápida e total da deformação sofrida após a realização do tratamento térmico.

Constatou-se que não houve nenhuma deformação plástica no material e, portanto, foi tomada a decisão de elevar novamente a carga aplicada. As imagens da Figura 49 demonstram o estado da placa após o carregamento e após o tratamento térmico no terceiro ensaio.



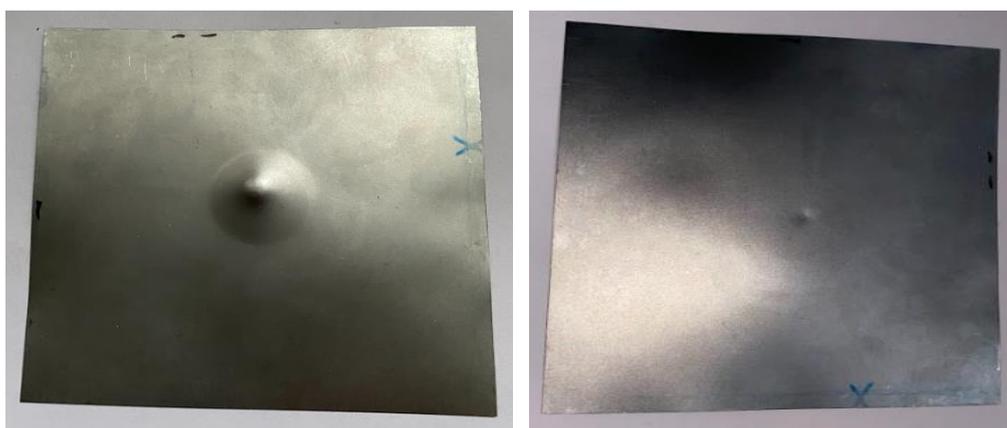
a - Deformação sofrida pela chapa no terceiro ensaio

b – Recuperação da chapa após tratamento térmico

**Figura 49 - Deformação e recuperação da chapa no terceiro ensaio**

**Fonte: Autor**

Para o quarto teste, foram utilizados os mesmos parâmetros do ensaio anterior, alterando apenas o valor da massa do carregamento de 30 Kg para 40 Kg. Neste teste, a carga foi aplicada em um ponto levemente descentralizado, o que resultou em uma moessa deslocada do centro da chapa. Após o tratamento térmico, a deformação da peça foi totalmente recuperada e não houve plasticidade em nenhum ponto. As imagens da Figura 50 demonstram o estado da placa após o carregamento e após o tratamento térmico no quarto ensaio.



a - Deformação sofrida pela chapa no terceiro ensaio

b – Recuperação da chapa após tratamento térmico

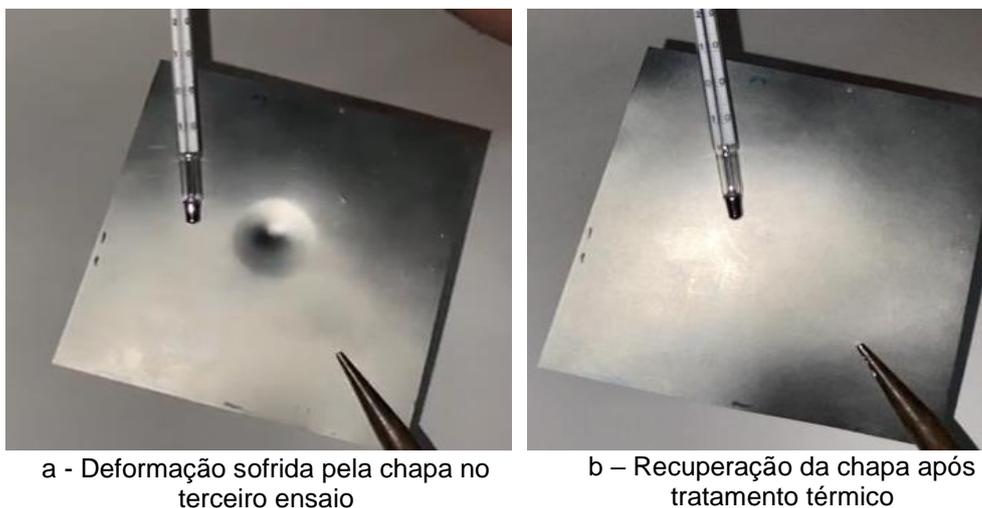
**Figura 50 - Deformação e recuperação da chapa no quarto ensaio**

**Fonte: Autor**

Por conta da descentralização do quarto ensaio, optou-se por repetir este teste, centralizando a carga. Como consequência disso, a mocha formada ficou localizada no centro da chapa, e, assim como no terceiro teste, recuperou-se completamente após tratamento térmico.

Neste ensaio, podendo-se considerar como o quinto ensaio, foi utilizado um termômetro para acompanhar a temperatura da peça durante o tratamento, já que o superaquecimento da peça pode comprometer a efetividade do EMF no material. Constatou-se que a chapa se recuperou completamente da deformação sofrida antes de atingir os 100 °C.

As imagens da Figura 51 demonstram o estado da placa após o carregamento e após o tratamento térmico no quinto ensaio.



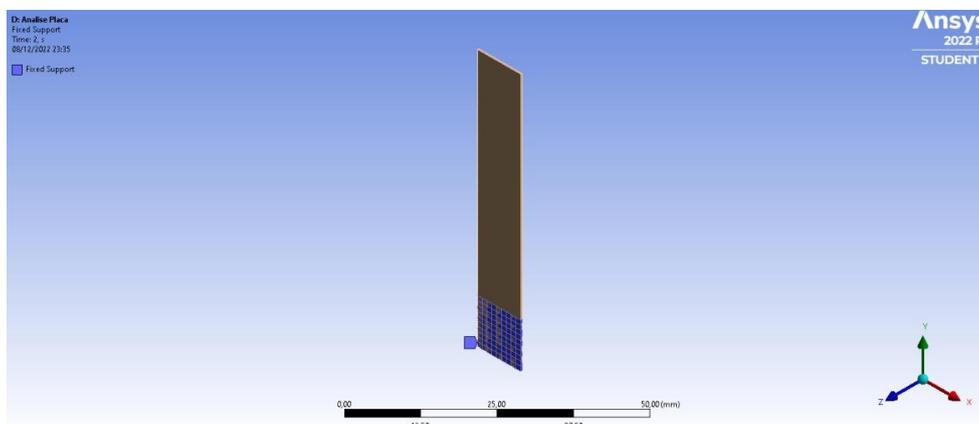
**Figura 51 - Deformação e recuperação da chapa no quinto ensaio**

**Fonte: Autor**

#### 5.2.4 Comparação numérica-experimental

A partir dos resultados obtidos através das análises computacionais, no software ANSYS, e experimentais através dos testes em laboratório, este subcapítulo explorará a comparação numérico-experimental dos dados obtidos em cada ensaio.

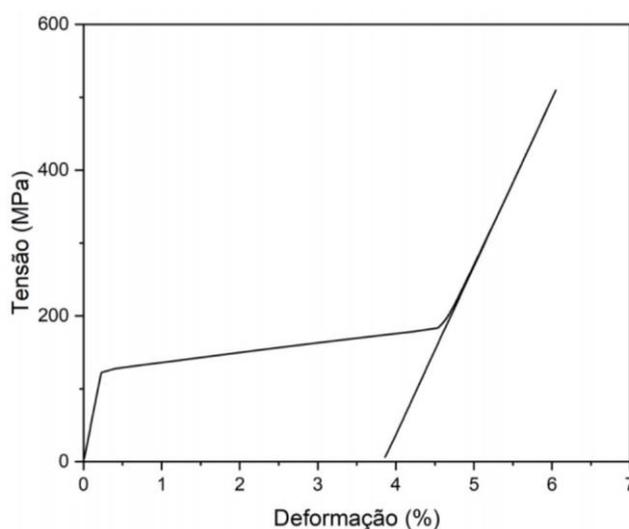
Diante disto, inicialmente, foi elaborada a simulação da placa com as mesmas dimensões do modelo experimental, conforme mostrado na Figura 52 abaixo.



**Figura 52 - Representação gráfica da placa Nitinol analisada**

**Fonte: Autor**

A região destacada em azul representa o local em que a placa foi engastada na máquina de ensaio de tração INSTRON. Na face superior, foi aplicado uma tensão de  $500\text{ MPa}$  para verificar o comportamento da curva de tensão e deformação da placa de Nitinol. O gráfico tensão e deformação obtido a partir da simulação acima está ilustrado na Figura 53 abaixo.



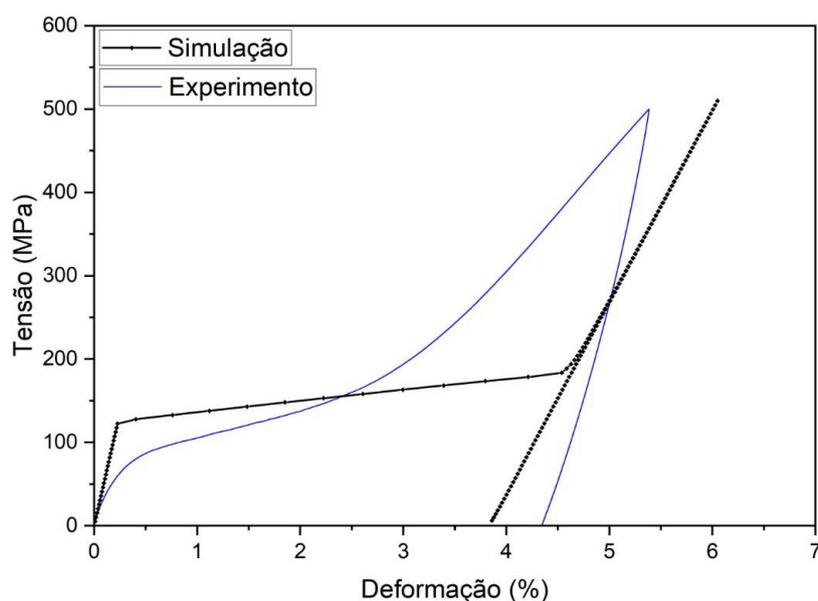
**Figura 53 - Ciclo de carregamento e descarregamento exercido sobre a placa**

**Fonte: Autor.**

A Figura 53 representa a deformação resultante da tensão aplicada com os parâmetros do experimento, ou seja, com o carregamento até  $\sigma = 500 \text{ MPa}$ , e, subsequentemente, o descarregamento.

Carregando o material até esta tensão, pôde-se verificar uma deformação de aproximadamente 6% e, ao fim do descarregamento, esta deformação retornou à aproximadamente 4%. A deflexão da curva representa a mudança estrutural por tensão da austenita para martensita.

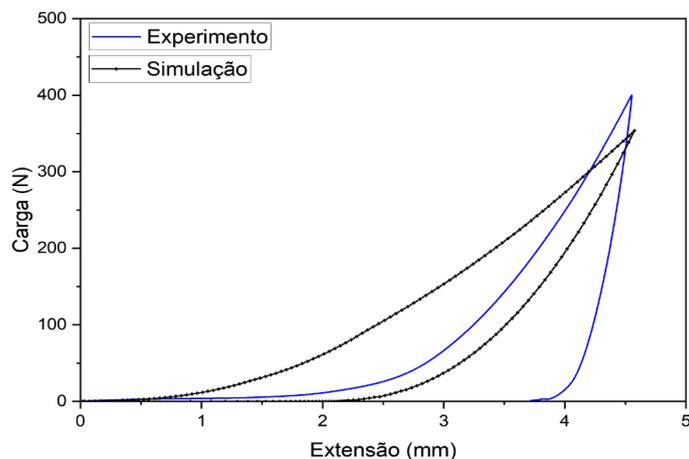
Realizando uma análise comparativa em ambos os gráficos, percebe-se uma diferença quantitativa da deformação obtida. Entretanto, a curva da simulação se comporta de maneira semelhante ao obtido experimentalmente. Esta comparação está ilustrada na Figura 54 abaixo.



**Figura 54 - Comparação dos resultados obtidos no experimento e na simulação relacionando tensão e deformação**

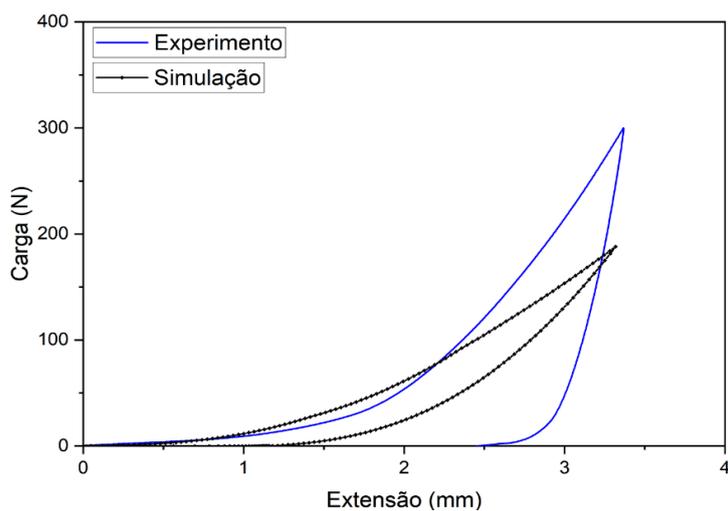
**Fonte: Autor.**

Com o objetivo de validar os resultados obtidos neste trabalho, realizou-se a comparação numérico-experimental, traçando os gráficos de deslocamento e carga obtidos através do ensaio da mocha com os resultados obtidos numericamente a partir da ferramenta de simulação ANSYS®. A configuração dos gráficos poderá ser encontrada nas Figuras 55, para 4,45 mm e Figura 56 para 3,34 mm.



**Figura 55 - Comparação dos resultados obtidos no experimento e na simulação relacionando carga e extensão máxima de 4,45 mm**

**Fonte: Autor**



**Figura 56 - Comparação dos resultados obtidos no experimento e na simulação relacionando carga e extensão máxima de 3,34 mm**

**Fonte: Autor**

É importante observar que, embora os gráficos distem quantitativamente, é possível verificar a semelhança comportamental entre ambos, reforçando a acuracidade qualitativa da simulação obtida.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Após a obtenção dos estados de deformação dos quatro estudos, pôde-se analisar o comportamento de recuperação de deformação para os quatro tipos de deslocamentos obtidos, após a aplicação de tratamento térmico.

Tendo em vista a verificação da satisfatória capacidade de recuperação da chapa quando submetida à carregamentos e subsequentes tratamentos térmicos, pode-se concluir a veracidade de sua aplicação na engenharia.

Para construir um modelo específico de aplicação, é necessário, primeiramente, selecionar o objeto de aplicação e a necessidade de implementação desta área de estudo sobre ele.

Após isso, é relevante realizar uma correlação numérico-experimental para analisar e prever possíveis resultados. A partir dos resultados numéricos obtidos, é necessária a modelagem de um aparato experimental que se aproxime da realidade na qual ele representa.

Com estas etapas preliminares concluídas, os testes experimentais apresentarão resultados a serem utilizados à título de comparação ao modelo experimental.

A utilização desses dados comparativos é de extrema importância para a realização de simulações cada vez mais complexas. A adequação da geometria do corpo de prova e do projétil, por exemplo, faz com que o modelo se aproxime cada vez mais da realidade à que as chapas metálicas estariam sendo submetidas no cotidiano.

Como prosseguimento para do presente trabalho, o aumento da espessura da chapa e a implementação de uma estrutura curvilínea expandiriam o potencial de utilização do modelo em diversos setores industriais.

Uma alternativa interessante diz respeito à análise de múltiplos carregamentos na chapa, sendo possível avaliar o comportamento do material quando submetido a este tipo de esforço, assim como a sua recuperação, seja ela total ou parcial.

Ademais, existe ainda a possibilidade do estudo de compósitos metálicos, utilizando uma chapa de aço reforçada com elementos de Nitinol. Com

isso, será possível o desenvolvimento de estudos que associem as LMF como reforço em outras estruturas.

Este tipo de estudo é essencial, visto que as propriedades termomecânicas do Nitinol, ao serem associadas a um material alternativo, podem oferecer soluções inovadoras e competitivas para o mercado, podendo ser aplicadas em inúmeros setores.

## 6.1 A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA COMO UM SETOR PROMISSOR

Nos dias atuais, a indústria automobilística prioriza soluções que tornem seus produtos mais seguros e com melhor desempenho. Parte desse aumento de performance pode ser associada ao uso de materiais inteligentes como substituto em diversas peças e dispositivos de um automóvel.

Em 1994, a empresa de automóveis Audi revolucionou o mercado lançando o primeiro carro com a carroceria de alumínio, o que gerou uma redução expressiva do peso do automóvel. Até então, o aço era a principal matéria prima utilizada em carros, entretanto o ganho de performance obtido através da mudança de material foi considerável, obsoletando o uso dos aços nessas estruturas.

Atualmente, a carroceria da maior parte dos carros é composta por alumínio e aço. De acordo com a Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), o setor de transportes é o maior consumidor desse elemento no mundo. Todavia, as reservas de bauxita e alumina, compostos dos quais são extraídos o alumínio, estão cada vez mais sobrecarregadas e sua disponibilidade de recursos diminui constantemente.

Diante deste cenário, pode-se considerar a indústria automobilística um setor com grande potencial, tendo em vista as diversas possíveis aplicações de materiais de Nitinol na estrutura dos automóveis. Componentes como portas, teto e capô, podem ser regiões importantes a serem analisadas para a utilização deste material.

Tal visualização baseia-se aos constantes impactos que essas seções podem sofrer. A citar, as portas e o capô dos carros podem ser sujeitos constantemente à pequenos amassos decorrentes de impactos de baixa tensão.

Especificando ainda mais os possíveis danos, os tetos dos carros podem sofrer deformações provenientes de diversas fontes. Por exemplo, o motorista pode estacionar o carro sob uma amendoeira e a queda livre de amêndoas sobre o teto poderá danificar esta região. Ademais, as chuvas de granizo também podem submeter o teto dos carros a deformações superficiais. A Figura 57 abaixo demonstra esses danos nos automóveis.



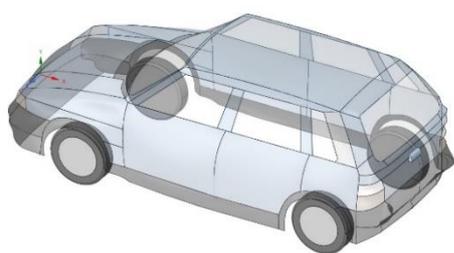
**Figura 57 - Deformação em automóvel causada por chuva de granizo**

**Fonte: Site Auto esporte [23]**

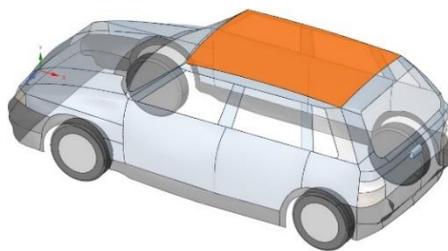
Considerando o contexto histórico, a otimização dos materiais constituintes dos veículos é de suma importância, visto que implica no aumento da performance e redução no consumo exacerbado de alumínio. Um estudo realizado pelo portal de notícias G1 mostra que a espessura das chapas externas de uma carroceria externa de alguns veículos da FIAT varia entre 0,7 mm e 0,8 mm. [22]

Mediante os fatos apresentados e considerando a necessidade de inovação no setor automobilístico, foi preliminarmente modelada aplicação de chapas de Nitinol no teto do carro modelo FIAT UNO, representado na Figura 58.

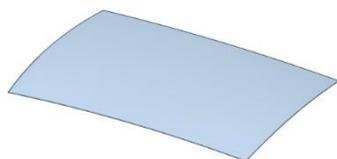
**Figura 58 - Aplicação exemplificada de chapas de Nitinol no teto de automóveis**



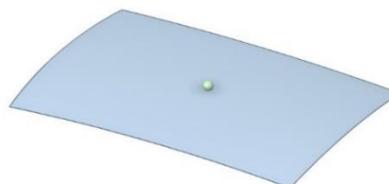
a – Geometria Modelo FIAT UNO



b – Área de estudo destacada



c – Placa do Capô isolada



d – Modelo completo (Chapa + objeto)

**Fonte: Autor**

Uma possível sugestão para trabalho futuro é desenvolvimento de um modelo numérico que pudesse representar o teto de um automóvel, com suporte estrutural feito com uma chapa metálica de Nitinol.

O objetivo desta análise, portanto, seria verificar o comportamento do suporte estrutural às deformações e o seu grau de recuperação mediante tratamentos térmicos, conforme foi apresentado nos modelos do capítulo 5 deste trabalho.

A partir destes dados, seria possível, por fim, realizar ensaios experimentais a fim de examinar e comparar pontos quantitativos, sobretudo a redução os custos relacionados à funilaria do automóvel com a utilização deste material inteligente.

Vale ressaltar a necessidade de avaliar a utilização de métodos de pintura adequados que suportariam a deformação e permanecessem intactos quando submetidos às tensões e, posteriormente, fosse tratado termicamente para completa recuperação da chapa.

Outra forma de verificar a viabilidade da substituição de peças estruturais de automóveis de outros materiais pelo nitinol, é válida a análise em ligas superelásticas, alumínio e aço nas dimensões já utilizadas para teto de veículos para que, a partir destas, seja possível identificar a alternativa que melhor implique ganhos de performance, custo e propriedades mecânicas aos objetos de estudo.

Em suma, existem inúmeras oportunidades de desenvolvimento de aplicações utilizando as ligas Níquel-Titânio, principalmente na indústria automobilística. O presente estudo possibilita a comparação de futuros resultados, sendo possível desenvolver uma aplicação concisa e inovadora nesta e em outras áreas para as quais o estudo de chapas metálicas é aplicável.

## **7 CONCLUSÃO**

A primeira parte deste trabalho teve como objetivo a modelagem e análise em elementos finitos do comportamento de uma chapa metálica de memória de forma, composta por Níquel-Titânio e avaliar suas possíveis aplicações na engenharia.

As informações existentes nas bibliografias utilizadas foram de excepcional importância para a verificação do potencial dos materiais com Efeito de Memória de Forma quanto às aplicações. Tendo em vista a versatilidade deste material, foi possível modelar este estudo à uma perspectiva pontual: viabilizar sua utilização na indústria automobilística, especificamente em partes da carroceria de automóveis.

Tendo em vista a modelagem proposta, foram realizadas simulações no software ANSYS, utilizando uma placa com geometria pré-determinada (quadrada) sofrendo deformação causada pela queda vertical de esferas de diferentes diâmetros, 10 mm e 20 mm, variando as alturas entre 10 mm e 100 mm.

De acordo com as análises realizadas na ferramenta de simulação, notou-se que a tensão gerada pela esfera de 10 mm de diâmetro não foi

suficiente para ultrapassar o limite elástico da liga de Nitinol, uma vez que, para superar o comportamento elástico da liga, é necessária uma tensão de pelo menos  $151,34 \text{ MPa}$ , e assim observar o efeito de memória de forma.

Observou-se, também, que para a esfera de 20 mm de diâmetro, a tensão transferida pelo impacto de queda livre ultrapassou o limite elástico da liga. Nesse sentido, foi realizado um tratamento térmico após a aplicação da tensão que recuperou totalmente a deformação sofrida pela placa.

Na segunda etapa deste trabalho, na qual a deformação foi causada por moesa, foi realizada uma simulação quase-estática em laboratório. O experimento retornou que para impactos cujo deslocamento consequente do carregamento aplicado à placa fosse de até 4,5 mm, um tratamento térmico de temperatura  $T = 100^\circ\text{C}$  foi necessário para recuperar em totalidade a deformação causada na chapa.

Diante disso, pôde-se notar que para impactos cujo diâmetro do objeto que provocará a deformação for pequeno, a deformação resultante poderá ser quase que imperceptível, porém, ainda presente, conforme visto no ensaio realizado com indentador com diâmetro de 6 mm.

Em suma, a partir dos resultados obtidos através das análises supracitadas, verifica-se que o Efeito Memória de Forma ocorre satisfatoriamente no corpo de prova, sendo possível avaliar a capacidade de recuperação aos danos sofridos pela chapa.

Assim pode-se concluir que o Nitinol é considerado apropriado para aplicações cuja chapa metálica esteja submetida a condições similares às deste estudo, sendo aplicável inclusive à funilaria de automóveis, conforme esperado mencionado.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MICHELON, M. D. **Estudo para obtenção de fios através de metalurgia do pó.** [S.1.]: 85f., Dissertação de Mestrado (Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- [2] CLARENCE MARVIN WAYMAN; KAZUHIRO OTSUKA. **Shape memory materials.** Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1999.
- [3] CARDOSO, C. et al. **Fios ortodônticos: conhecer para otimizar a aplicação clínica.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/dpress/a/NX9J9MYn4YWv7QfwppS5JFj/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- [4] VECHIETTI, F. A. - **Estudo das Temperaturas de Transformação de Fases e da Caracterização da Superfície da Liga Ni-Ti submetida a diferentes Tratamentos Térmicos para Aplicação em Órtese Metálica.** Dissertação de Mestrado (Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [5] WAYMAN, C. M.; HARRISON, J. D. **The origins of the shape memory effect.** JOM, v.41, n.9, p. 26–28, set.1989.
- [6] KUMAR PATEL, S. et al. A brief review of shape memory effects and fabrication processes of NiTi shape memory alloys. **Materials Today:**
- [7] CLARENCE MARVIN WAYMAN; KAZUHIRO OTSUKA. **Shape memory materials.** Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1999.

[8] LAGOUDAS, D.; QIDWAI, M.A.; ENTECHV, P.B. **Shape Memory Alloys: Modelling and Engineering Applications**. Boston, MA, Springer US, 2008. V.1.

[9] **SOLID186**. Disponível em: <[https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_SOLID186.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html)>.

[10] Melton, K. N. (1998) General applications of SMA's and smart materials. In: Otsuka, K., Wayman, C. M. (eds.) **Shape Memory Materials**. Cambridge University Press, p.220-239.

[11] MOHD JANI, J. et al. **A review of shape memory alloy research, applications and opportunities**. Materials & Design (1980-2015), v. 56, p. 1078–1113, abr. 2014.

[12] AURICCHIO, F.; SACCO, E., "A Superelastic Shape-Memory-Alloy Beam Model", **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, n. 6, 1997.

[13] DUERIG, T. W.; MELTON, K. N.; STÖCKEL, D., et al., **Engineering Aspects of Shape Memory Alloys**. 1 ed. [S.I.], Butterworth-Heinemann, 1990.

[14] OHBA, T.; OTSUKA, K.; SASAKI, S. **Study of Rubber-Like Behaviour in a Au-47.5at% Cd Alloy by Synchrotron-Orbital Radiation**. Materials Science Forum, v. 56-58, p. 317–322, jan. 1991

[15] FUNAKUBO, H.; KENNEDY, J. B. (Ed.). **Shape Memory Alloys**. Tokyo: Gordon and Breach Science Publishers, 1987. v. 1. (Precision Machinery and Robotics).

[16] CASTILHO, W.S.; SILVA, E.P. **Algumas aplicações das ligas com memória de forma**. Sinergia, v.12, p.99-108, 2011.

[17] DUERIG, T.; PELTON, A.; STOECKEL, D. **An Overview of nitinol medical applications**. Materials Science & Engineering, Freemont, 1999. 149-160.

[18] OLIVEIRA, C. A. do N. **Caracterização termoelástica de atuadores helicoidais da liga CuZn-Al com memória de forma**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Federal de Pernambuco – PE, 2007.

[19] AURICCHIO, F. A robust integration-algorithm for a finite-strain shape memory alloy. **International Journal of Plasticity**, v.17, p.971-990, 2001.

[20] RAO, A.; SRINIVASA, A. R.; REDDY, J. B. **Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. Springer, 2015.

[21] AURICCHIO, F; CODA, A.; REALI, A.; URBANO, M. **Journal of Materials Engineering and Performance**, vol. 18, pp. 649-654, 2009.

- [22] FONSECA, RICARDO LOPES. **Tire dúvidas sobre a carroceria do veículo**. Disponível em: < <https://g1.globo.com/Noticias/Carros/0,,MUL1176309-9658,00-TIRE+DUVIDAS+SOBRE+A+CARROCERIA+DO+VEICULO.html#:~:text=A%20espessura%20dessa%20pe%C3%A7a%20pode,em%20caso%20de%20uma%20batida>>. Acesso em: 18 dez. 2022.
- [23] **Cuidados com o carro na chuva de granizo**. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/servicos/noticia/2017/02/cuidados-com-o-carro-na-chuva-de-granizo.ghtml>>. Acesso em: 30 dez. 2022.
- [24] MONTEIRO, P.C.C.; L.L.S. MONTEIRO; SAVI, M.A.; 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, p.1415-1427, 2017.