



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO MACHADO DA CUNHA

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE UMA
GANCHEIRA DE BICICLETA EM LIGA MEMÓRIA DE FORMA**

JOÃO PESSOA

2019

PEDRO MACHADO DA CUNHA

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE UMA
GANCHEIRA DE BICICLETA EM LIGA MEMÓRIA DE FORMA**

Monografia de graduação apresentada ao Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

JOÃO PESSOA

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C972a Cunha, Pedro Machado da.

ANÁLISE NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE
UMA GANCHEIRA DE BICICLETA EM LIGA MEMÓRIA DE FORMA /
Pedro Machado da Cunha. - João Pessoa, 2019.
35 f. : il.

Orientação: Marcelo Cavalcanti Rodrigues.
Monografia (Graduação) - UFPE/CT.

1. gancheira, liga memória de forma. I. Rodrigues,
Marcelo Cavalcanti. II. Título.

UFPE/BC

PEDRO MACHADO DA CUNHA

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE UMA
GANCHEIRA DE BICICLETA EM LIGA MEMÓRIA DE FORMA**

Monografia de graduação apresentada ao Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da
Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica

João Pessoa, 25 de novembro de 2019.

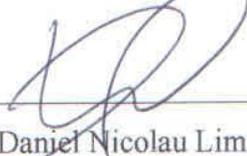
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Universidade Federal da Paraíba



Eng.º Genilton de França Barros Filho
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Me. Daniel Nicolau Lima Alves
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que estiveram comigo nessa jornada da graduação de engenharia mecânica, desde minha família e amigos, colegas que dividiram comigo madrugadas na universidade estudando para as provas e todos os professores responsáveis pela minha formação profissional e pessoal. Muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de realizar uma análise numérica através do método dos elementos finitos de um protótipo de gancheira de bicicleta feita de liga de memória de forma. A gancheira é um elemento de união entre o câmbio traseiro e o quadro da bicicleta, sendo responsável por absorver impactos e ser sacrificada em casos de tensões excessivas, poupando os componentes de maior valor que une. Para a análise desenvolveu-se um protótipo de geometria similar e através do Workbench do ANSYS® 2019 R3, software comercial de elementos finitos com suporte integrado a ligas memória de forma, simulou-se condições ao componente de modo que sofresse uma deformação que comprometesse o sistema de troca de marchas da bicicleta. Os resultados mostraram que com o aquecimento deste componente ele terá sua forma pré-estabelecida novamente, livre de tensões residuais, tornando o componente adequado novamente para uso sem comprometer a performance do atleta e a troca de marchas.

Palavras-chave: gancheira, liga memória de forma, método dos elementos finitos, análise numérica.

ABSTRACT

This work aims to perform a numerical analysis through the finite element method of a bicycle derailleur hanger prototype made of shape memory alloy. The hanger is a connecting element between the rear derailleur and the bicycle frame, being responsible for absorbing impacts and being sacrificed in case of excessive stress, saving the higher value components that attaches. A similar geometry prototype was developed for the analysis and through the ANSYS® 2019 R3 Workbench, a commercial finite element software with integrated shape memory alloy support, conditions were simulated to the component so that it suffered a deformation that compromised the bicycle gear shift system. The results showed that with warming up of this component it will have its pre-set shape again, free of residual stress, making the component suitable again for use without compromising athlete performance and gear shifting.

Key words: derailleur hanger, shape memory alloys, finite elements method, numerical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas cristalinas de uma LMF -	16
Figura 2 - Transformação de fase em LMF.	16
Figura 3 - Gráfico tridimensional descrevendo os comportamentos termomecânicos de LMF.	17
Figura 4 - Divisão de um domínio em elementos e nós.	19
Figura 5 - Principais tipos de elementos utilizados no MEF	19
Figura 6 - Sistema de transmissão de uma mountain bike	13
Figura 7 - Processo de alinhamento de gancheira.	14
Figura 8 - Modelo específico de gancheira.	23
Figura 9 - Conjunto quadro, gancheira e câmbio	23
Figura 10 - Protótipo da gancheira elaborado no DesignModeler.....	24
Figura 11 - Suporte fixo inserido na parte em destaque.	25
Figura 12 - Esforço submetido ao dispositivo.	25
Figura 13 - Malha gerada pelo software.	27
Figura 14 – (A) Deformação no momento da carga máxima. (B) Deformação residual após liberação da carga.	28
Figura 15 – (A) Tensão de Von-Mises no momento da carga máxima. (B) Tensão de Von- Mises residual após liberação da carga.....	28
Figura 16 - Deformação residual após aquecimento	29
Figura 17 - Tensões residuais após aquecimento.	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Força e temperatura ao longo dos steps.	26
Gráfico 2 - Qualidade dos elementos.	27
Gráfico 3 - Gráfico tensão deformação sem aumento de temperatura.	29
Gráfico 4 - Gráfico tensão deformação com aquecimento.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	MATERIAIS INTELIGENTES	15
2.2	LIGAS MEMÓRIA DE FORMA (LMF).....	15
2.2.1	Efeito memória de forma e pseudoelasticidade.....	17
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	18
2.4	MODELAGEM DE UMA LIGA MEMÓRIA DE FORMA	21
2.5	BREVE HISTÓRICO DAS BICICLETAS.....	12
2.6	O SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA BICICLETA.....	13
2.7	CÂMBIO TRASEIRO.....	13
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	23
3.1	MODELO EM CAD.....	24
4	RESULTADOS obtidos.....	26
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
6	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

É notória a evolução do ciclismo como esporte popular, é notório o aumento de grupos que saem juntos para prática da atividade física seja em meio às vias públicas ou em trilhas. Com a popularização deste esporte cada vez mais o consumo por bicicletas e equipamentos mais sofisticados aumentam, com isto, até os atletas amadores adquirem bicicletas de nível profissional com alta tecnologia embarcada que visam desde reduzir o peso da bicicleta até gerar conforto na atividade.

Agregado ao alto valor destes equipamentos está um alto custo de manutenção, os equipamentos mais sofisticados requerem mais manutenções periódicas e tem vida útil mais curta. Um conjunto de componentes que causa um grande impacto na performance é o sistema de transmissão. Este conjunto é composto basicamente pelo pedivela com as coroas, o cassete, a corrente, os câmbios que são responsáveis pelas trocas de marchas e os passadores. Cada vez as empresas que produzem estes componentes evoluem mais, oferecendo periodicamente novos conjuntos que chamam atenção dos atletas.

Dentro do conjunto da transmissão o câmbio traseiro, quando não opera adequadamente, compromete significativamente a performance do atleta, visto que as trocas de marchas não serão precisas. Tal fenômeno pode ocorrer devido ao fato do elemento de montagem do câmbio, a gancheira, estar empenada. Este empeno pode ocorrer gradativamente com os impactos sofridos por pedras e galhos em meio a trilhas ou de modo abrupto por uma troca inadequada de marchas ou impacto brusco de uma queda, por exemplo. Em qualquer dos modos as gancheiras podem passar por um processo de desempenho que restaura suas condições básicas e faz com que o câmbio troque as marchas adequadamente, entretanto este procedimento causa deformações plásticas na gancheira, de modo a gerar tensões residuais e uma conseqüente fragilização que pode retardar sua vida.

As ligas memória de forma são um subconjunto de uma vasta classe de materiais inteligentes, as funcionalidades deste material surgem quando sua microestrutura sofre alterações quando submetidas a estímulos externos como mudanças de temperatura ou campo magnético. A propriedade deste material de retornar uma forma pré-determinada após aquecida chama-se efeito memória de forma (RAO et al, 2015).

As ligas de memória de forma têm a capacidade de dissipar e absorver energia pois suporta uma mudança de fase reversível com histerese quando submetido a uma carga termomecânica cíclica. Estas propriedades habilitam estes materiais a aplicações em uma ampla

variedade de áreas como aeroespacial, biomédica, ortodôntica (SILVA, 2016). Sendo este trabalho uma aplicação em componente de bicicletas.

Deste modo, este trabalho tem por objetivo a análise numérica através do método dos elementos finitos de uma gancheira de bicicleta feita em liga memória de forma. Este equipamento fabricado neste material tornaria sua manutenção mais fácil, rápida, de menor custo e, além disto, sem causar fragilização em sua microestrutura.

Os resultados deste trabalho foram obtidos através do *ANSYS® Workbench 2019R3*, um software comercial de elementos finitos com suporte nativo para ligas memória de forma.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BREVE HISTÓRICO DAS BICICLETAS

Os primeiros registros da existência da bicicleta que se aproxima do modelo atual ocorreram em projetos do inventor italiano Leonardo da Vinci em meados de 1490. Em 1680 um alemão chamado Stephan Farffler projetou e construiu cadeiras de rodas tracionadas por propulsão manual, um projeto que se aproximava da ideia da bicicleta mas não em sua essência, pode-se dizer que o Barão Karl von Drais é o inventor da bicicleta pois em 1817 ele executou um projeto desenvolvido pelo Conde de Sivrac chamado celerífero (CALLISXTO, 1967). Este equipamento foi construído de madeira com duas rodas interligadas por uma viga e um suporte para apoiar as mãos, o projetista preocupou-se em instalar um sistema de direção e guidão, permitindo que o equipamento fizesse curvas mantendo o equilíbrio da bicicleta (MANFIOLETE, AGUIAR, 2013).

A primeira bicicleta tracionada com sistema de corrente foi projetada em 1874 por H. J. Lawson, tendo maior estabilidade e segurança. Nesta mesma época foi criada a Michaux, primeira fábrica de bicicletas com cerca de 200 operários que faziam 140 unidades ao ano (CALLISXTO, 1967).

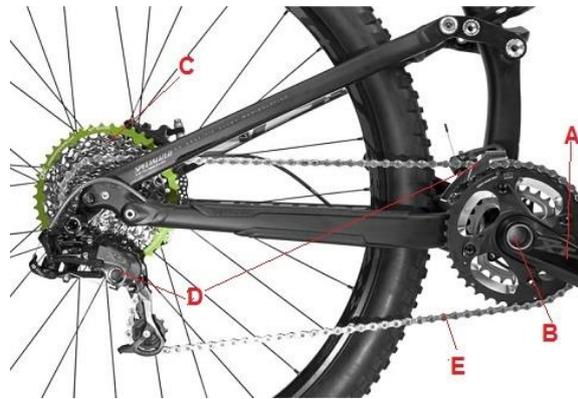
Um grande avanço para segurança e conforto dos usuários das bicicletas foi o desenvolvimento e produção dos pneus. Jhon Boyd Dunlop patenteou o pneu com câmara de ar em 1888. Isto fez com que a bicicleta se tornasse um meio de transporte simples, eficiente, seguro e confortável. A partir daí a bicicleta foi levada para todas as partes do mundo com boa aceitação na maior parte dos lugares onde chegou (BELLOTO, 2009).

No final dos anos 70 começa a aparecer o mountain bike, um grupo de garotos que usavam a bicicleta apenas por diversão que acabou por se transformar numa modalidade esportiva. Na época a bicicleta mais utilizada era a Schwinn Excelcior, que pesava em torno de 22,6 kg. Com tanto peso, subir as montanhas sobre a bicicleta era praticamente impossível, assim as bicicletas começaram a ser modificadas, primeiramente com adaptação de um sistema de freio a tambor e mais tarde uma relação de marchas que permitiu que o ciclista subisse as ladeiras pedalando (ESCOLA DE BICICLETA, 2019)

2.2 O SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA BICICLETA

O sistema de transmissão de movimento da bicicleta é feito por coroas, pinhões e uma corrente, responsável por transformar a energia gasta pelo ciclista em movimento. Os componentes da bicicleta são de fácil percepção e entendimento, entretanto alguns detalhes sobre seu funcionamento e manutenção devem ser levados em consideração. A Figura 6 mostra o sistema de transmissão de uma mountain bike.

Figura 1 - Sistema de transmissão de uma mountain bike



Fonte: Aventrilha, 2017.

O dispositivo A, chamado de pedivela, é o responsável por receber o esforço do ciclista e está acoplado em B, chamado de movimento central que torna o pedalar possível. O cassete C é uma série de coroas acopladas ao mesmo eixo da roda traseira, assim transmitindo o movimento. Os câmbios D são responsáveis por mudar a posição da corrente E entre as coroas do pedivela e do cassete deixando a bicicleta mais rápida ou devagar. (AVENTRILHA, 2017).

2.3 CÂMBIO TRASEIRO

O uso das marchas na bicicleta a tornou acessível e agradável para todos, além disto, foi fundamental para que o mountain bike fosse possível. Até hoje, ainda não foi desenvolvido um sistema de troca de marchas para bicicletas mais eficaz do que o por corrente utilizado nas atuais.

Todo ciclista deve conhecer quando seu câmbio não está em perfeito funcionamento e os sintomas são bem evidentes quando uma troca de marchas é solicitada e algo inesperado como trocas excessivas ou a não realização do comando ocorre. Entretanto, esta peça está situada em local vulnerável, sujeita a impactos com rochas, outras bicicletas, calçadas que

podem inutilizar o dispositivo. Além destes problemas, o esporte faz com que sujeira, umidade, lama e corrosão afetem constantemente a vida do equipamento, deste modo, um procedimento de limpeza e manutenção periódico é fundamental.

Os câmbios traseiros podem ser montados à bicicleta de duas maneiras: diretamente no quadro através de um parafuso ou através de uma gancheira como elemento intermediário. A gancheira é uma peça geralmente feita de alumínio que serve como dispositivo de sacrifício para que, caso o câmbio esteja mal regulado, uma troca de marchas errada ou tensões excessivas ocorram no sistema ela se quebre ou amasse ao invés do quadro ou do câmbio. O método mais utilizado de montagem dos câmbios, e presente na maioria das bicicletas atuais, é com o uso da gancheira. Caso uma gancheira quebre ou empene no meio de uma atividade o ciclista deverá encurtar sua corrente e utilizar uma relação única até o final da atividade, caso o mesmo possua um dispositivo reserva, pode ser feita a substituição com as ferramentas adequadas já no local.

Os câmbios atuais necessitam que a gancheira tenham um bom alinhamento para que o câmbio funcione de forma precisa. A Figura 7 mostra o processo de alinhamento da gancheira.

Figura 2 - Processo de alinhamento de gancheira.



Fonte: Downs, 2015.

O processo consiste em encaixar a ferramenta de desempenho na gancheira e usar um ponto da roda como guia, o braço possui uma haste em sua extremidade que servirá como referência, ao girar a roda e a ferramenta a haste deve continuar encostando na roda, indicando que o alinhamento da gancheira está adequado, caso não esteja, esta ferramenta é utilizada como braço para desempenar a gancheira até que chegue na situação ideal (DOWNS, 2015). O grande problema deste procedimento é que várias deformações plásticas estão sendo aplicadas ao dispositivo, o que gera tensões residuais e o fragiliza.

2.4 MATERIAIS INTELIGENTES

Por séculos os metais têm papel fundamental na ciência dos materiais, técnicas de ligamento, tratamentos térmicos e conformação destes materiais vêm sendo aprimorado desde a era do bronze e do ferro. Os avanços tecnológicos permitiram um avanço no conhecimento sobre ciência dos materiais, fazendo com que o homem se aprofundasse até sua microestrutura, desenvolvendo novas técnicas de processamento e novas ligas com inúmeras aplicabilidades. A demanda por materiais sempre mais resistentes, mais leves e a maior assertividade nas propriedades mecânicas acabou por gerar um novo tipo de material chamado materiais multifuncionais e, dentro deste grupo, estão os materiais inteligentes (LAGOUDAS, 2008).

Os materiais inteligentes são usualmente utilizados como atuadores e sensores e são capazes de alterar sua forma, rigidez, frequência natural, dentre outras propriedades mecânicas, mediante estímulos externos. Atualmente, os materiais inteligentes mais utilizados são as ligas com memória de forma, as cerâmicas piezoelétricas, os materiais magneto-strictivos e os fluidos reológicos.

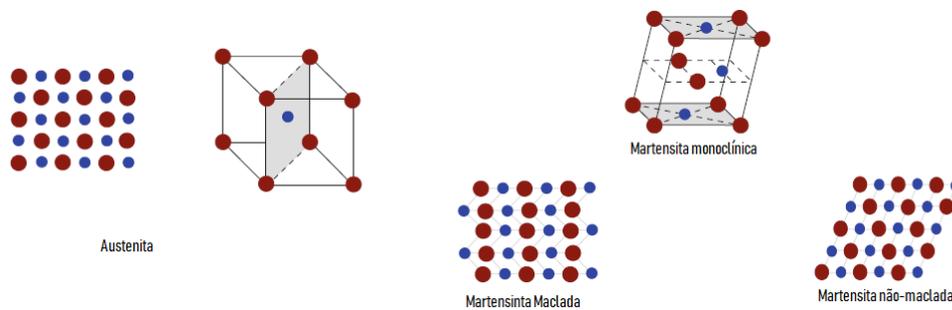
2.5 LIGAS MEMÓRIA DE FORMA (LMF)

As ligas com memória de forma são ligas metálicas capazes de recuperar sua geometria original através de estímulos externos, sejam de temperatura ou de tensão, que induzirão uma transformação de fase no material. Estas ligas apresentam comportamentos termomecânicos singulares, os mais conhecidos e utilizados em projetos são: a pseudoelasticidade (ou superelasticidade), o efeito de memória de forma, a transformação de fase por variação de temperatura e o efeito memória de forma reversível (OLIVEIRA, 2017).

Oliveira (2015) citando Kauffman & Mayo (1993) afirma que as ligas memória de forma mudam de fase ainda no estado sólido. Estas mudanças causam um rearranjo estrutural no material e são conhecidas como martensíticas e austeníticas. De fato, duas microestruturas estão associadas as LMF, a austenita, que possui uma microestrutura cúbica de corpo centrado bem ordenada, com apenas uma variante, e é estável em altas temperaturas e a martensita, estável em baixas temperaturas e com vinte quatro variantes, sua microestrutura depende do tipo de transformação sofrida.

Cada metal possui uma estrutura cristalina particular de acordo com seus elementos de liga, entretanto, nem todos terão as propriedades que os metais com propriedade memória de forma. As ligas memória de forma possuem duas fases, a austenita e a martensita, a segunda pode aparecer na forma maclada ou não maclada (NARESH et. al., 2016). A fase austenítica se apresenta numa estrutura cúbica ordenada enquanto a fase martensítica pode se apresentar em estrutura tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica e, por não possuir estrutura cúbica, pode ter diferentes orientações (RAO et al, 2015). A Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo da estrutura cristalina austeníticas e estruturas martensíticas.

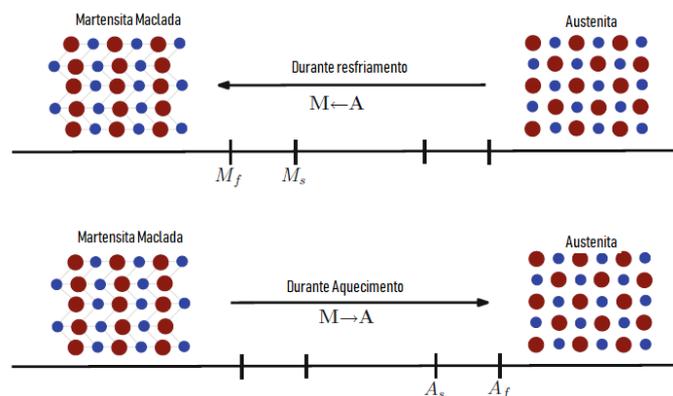
Figura 3 - Estruturas cristalinas de uma LMF



Fonte: Adaptado de RAO (2015).

As mudanças de fase ocorrem ao longo de temperaturas de transformação características, estas foram denominadas como martensita inicial (M_s), martensita final (M_f), austenita inicial (A_i) e austenita final (A_f) (RAO, 2015). Como já dito anteriormente, a martensita é uma fase estável em baixas temperaturas e austenita em altas temperaturas. A Figura 2 ilustra a transformação entre essas duas fases em função da variação da temperatura.

Figura 4 - Transformação de fase em LMF.

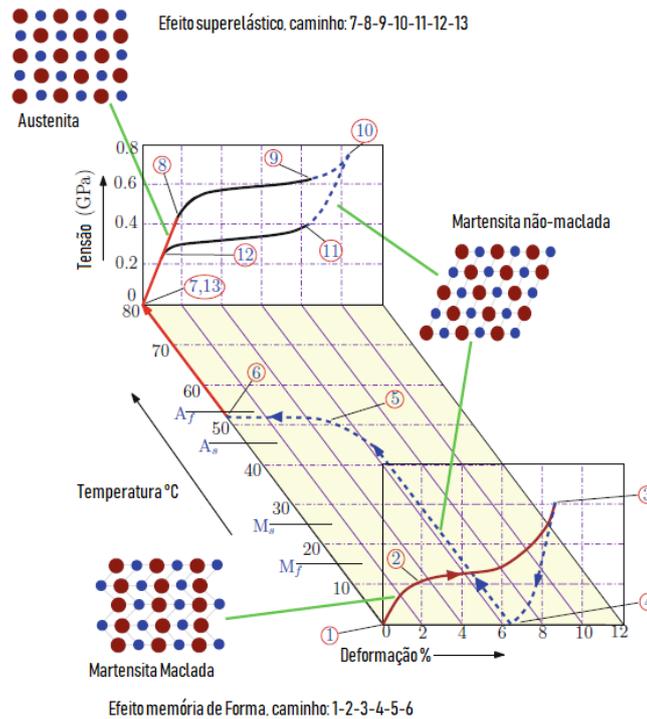


Fonte: Adaptado de RAO (2015).

2.5.1 Efeito memória de forma e pseudoelasticidade

A habilidade de uma LMF retornar a uma geometria pré-estabelecida após aquecida acima da temperatura A_f é chamada de efeito memória de forma. O gráfico da Figura 3 mostra o comportamento relacionando a tensão, deformação e a temperatura.

Figura 5 - Gráfico tridimensional descrevendo os comportamentos termomecânicos de LMF.



Fonte: Adaptado de RAO (2015).

A parte frontal do gráfico refere-se ao efeito memória de forma que seguirá o caminho do ponto 1 ao 6 para ter o fenômeno completo. Partindo do ponto 1 ao 2, o corpo em LMF está sobre um esforço externo de baixa magnitude e, caso este esforço seja cessado, terá o efeito semelhante a uma deformação elástica de metais comuns. Do ponto 2 ao 3, sob tensões de maior intensidade a microestrutura martensítica varia de maclada para não-maclada e ocorrerá uma deformação pseudoplástica, pois quando liberada a carga, do ponto 3 ao 4, uma parte da deformação será recuperada elasticamente, porém é perceptível que o material não retornará a dimensão original do ponto 1. Esta deformação residual pode ser restaurada nas LMF a aquecendo. O caminho 4-5-6 mostra um aquecimento acima da temperatura A_f , quando todas as deformações residuais foram restauradas e microestrutura sai da martensita não-maclada para austenita cúbica e estável. No ponto de temperatura A_s a microestrutura começa a se transformar em austenítica, estando finalizada quando atingir o ponto A_f . No caminho 6-1, caminho que representa o resfriamento da liga, no ponto M_s a austenita começa a se converter

em martensita, estando finalizada no ponto de temperatura M_f , quando a microestrutura estará totalmente convertida em martensita maclada (RAO 2015).

Já a parte posterior do gráfico contempla o efeito da superelasticidade, ou pseudoelasticidade. De imediato, deve-se perceber que este fenômeno ocorre em temperaturas a qual a austenita é estável, ou seja, temperaturas superiores a A_f . O caminho 7-8, sob tensões de baixa intensidade, a austenita sofre uma deformação com comportamento semelhante à clássica deformação elástica. Com o aumento da carga, representada no caminho 8-9 a austenita começará a se transformar em uma variante da martensita, a martensita induzida por tensão. O caminho 9-10 ilustra uma situação de tensão em que toda austenita se converte na martensita induzida. Vale salientar que, caso o nível de tensão se exceda, o material se deformará plasticamente e não retornará seu formato de origem. O caminho 10-11-12 representa a transformação reversa da martensita induzida para austenita. O caminho 12-13 já mostra uma resposta superelástica ideal, a geometria linear do gráfico mostra um comportamento elástico, característico da austenita. As transformações em ambas direções podem causar fases residuais, que podem causar alguma deformação residual, porém de magnitude irrelevante (RAO, 2015).

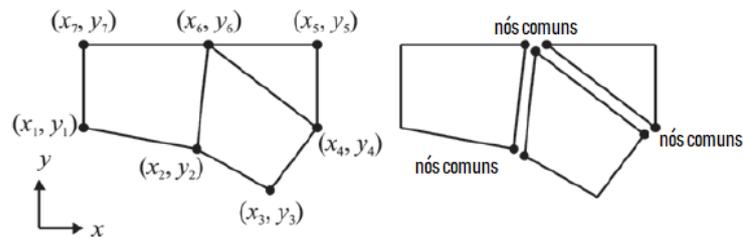
2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O método dos elementos finitos baseia-se na ideia de dividir um corpo de geometria complexa em vários blocos de geometria simples. Este princípio está inserido no nosso cotidiano em várias situações, inclusive na engenharia. Uma situação comum são os brinquedos de montar em que as crianças, juntado várias peças de geometria simples, constroem algo mais complexo como carros, navios etc. (CHEN, LIU, 2015).

Madenci e Guven (2015) definem o MEF como uma ferramenta computacional poderosa, utilizada para solucionar problemas reais de engenharia com domínios complexos e sujeitos as mais diversas condições de contorno. A base do MEF consiste na decomposição de um domínio num número finito de subdomínios de modo que uma solução sistemática é obtida aplicando métodos residuais variados ou ponderados. De fato, o MEF reduz o problema a um número finito de incógnitas, dividindo o domínio em elementos e expressando o fenômeno a ser analisado em termos de funções aproximadas assumidas dentro de cada elemento. Essas funções (também chamadas de funções de interpolação) são definidas a partir dos valores das variáveis em pontos específicos, chamados de nós. Os nós geralmente estão localizados ao longo dos limites do elemento e conectam elementos adjacentes.

O nó é o elemento de conexão entre elementos vizinhos, ele é responsável também por definir sua posição e a relação com os graus de liberdade e fenômenos físicos existentes no problema. Caso um nó não esteja definido no sistema matricial de equações, ele representará uma (ou mais) variáveis. Variáveis nodais atribuídas a um elemento são chamadas de graus de liberdade do elemento (MADENCI, GUVEN, 2015). A Figura 4 mostra esquematicamente a configuração entre elementos e nós.

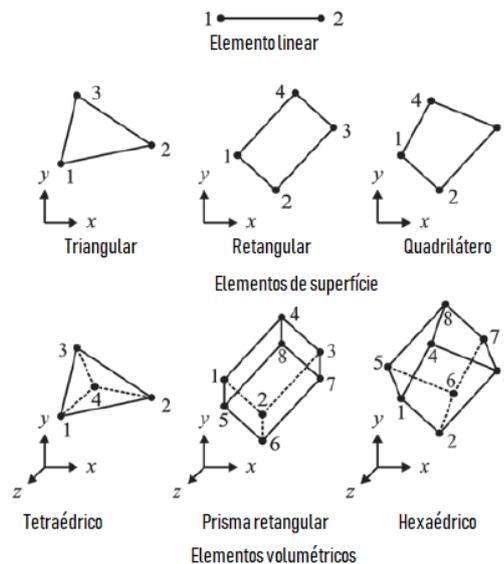
Figura 6 - Divisão de um domínio em elementos e nós.



Fonte: Adaptado de Madenci e Guven (2015).

Dependendo da geometria e da natureza do problema, o domínio pode ser discretizado em elementos lineares, de superfície ou volume. A Figura 5 ilustra os principais tipos de elementos, cada um deles é definido por um número e sequência específica de nós globais.

Figura 7 - Principais tipos de elementos utilizados no MEF



Fonte: Adaptado de Madenci e Guven (2015).

Para uma modelagem em elementos finitos adequadas, pode-se tomar como base oito passos elementares. Cada passo será descrito com detalhes a seguir (SILVA, 2016):

- a) Idealização do problema: hipóteses e suposições devem ser feitas de modo a simplificar o problema, possivelmente reduzindo ou aproximando dimensões, caracterizando condições de apoio ou removendo detalhes como pequenos furos ou abaulamentos que são insignificantes para análise.
- b) Discretização do domínio: agrupamento da geometria em formas mais simples, os elementos são interconectados por nós comuns.
- c) Escolha do tipo de elemento: cada tipo de elemento possui uma teoria de formulação que prevê o uso e capacidades de modelagem. A Figura 5 ilustra os principais tipos de elementos.
- d) Formação da malha de elementos: as equações para cada elemento são montadas em um conjunto de equações globais de modelarão as propriedades do sistema em análise.
- e) Aplicação das condições de contorno: o problema deve ser adequadamente restringido para que movimentos não correlacionados ocorram.
- f) Solução das equações: feitas para variáveis principais.
- g) Solução das variáveis derivadas: calculadas através dos valores dos graus de liberdade nos nós através das relações presentes nas teorias de cada elemento.
- h) Avaliação dos resultados: verificar e discutir as respostas obtidas aos esforços termomecânicos aplicados.

Em casos que a linearidade física não ocorre, a mudança na rigidez da estrutura se dá devido grande variações dimensionais. Por exemplo, quando se traciona uma barra longitudinalmente, ao mesmo tempo que seu comprimento é elevado a uma contração lateral, isto faz com que uma modificação na área da seção transversal ocorra, portanto, modificando sua rigidez.

Os softwares comerciais de elementos finitos chamam o incremento no carregamento de passo de carregamento ou apenas passo. Em casos de não-linearidade é necessário a convergência de um processo de iteração, o passo de carregamento é então dividido em subpassos, em que cada subpasso é basicamente um incremento de carga dentro do passo de

carregamento. As iterações de cada subpasso são chamadas de iterações de equilíbrio (OLIVEIRA, 2017).

2.7 MODELAGEM DE UMA LIGA MEMÓRIA DE FORMA

A representação de uma liga memória de forma no *ANSYS* se dá através do modelo constitutivo baseado no modelo proposto por Auricchio (2009). Os parâmetros estabelecidos estão identificados e detalhados a seguir (SILVA, 2016):

- a) E_A : módulo de elasticidade da austenita ou módulo de Young. Medido em MPa;
- b) E_M : módulo de elasticidade da martensita. Medido em MPa;
- c) ν : constante de Poisson. Para este modelo a mesma constante é considerada para fase austenítica e martensítica. Adimensional;
- d) h : coeficiente angular da curva tensão-deformação durante a transformação direta e inversa. Medido em MPa;
- e) T_o : temperatura de referência para o estado livre de deformações na ausência de tensões aplicadas. Medido em K;
- f) R : raio do domínio elástico para todas as temperaturas. Para este modelo, não há evolução com a temperatura;
- g) β : coeficiente angular da curva de tensão com respeito a temperatura. Medido em MPa/K;
- h) ε_L : máxima deformação de transformação. Refere-se a máxima deformação obtida pela reordenação das fases martensíticas. Adimensional;
- i) m : parâmetro de dependência de Lode, uma relação sobre a simetria ou assimetria entre as tensões críticas de tração e compressão. Adimensional.

Imakoa (2014), mostrou em seu material de suporte ao Ansys as equações necessárias para modelagem dos itens mencionados.

Equação 1 – Coeficiente angular da curva tensão deformação durante as transformações

$$h = \frac{2}{3} \frac{\sigma_f^{AS} - \sigma_s^{AS}}{\varepsilon_L}$$

Equação 2 - Raio do domínio elástico para todas as temperaturas

$$R = \frac{\sigma_f^{AS} - \sigma_s^{SA}}{2} \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Equação 3 - coeficiente angular da curva de tensão com respeito a temperatura.

$$\beta = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sigma_s^{AS} + \sigma_f^{SA}}{2}}{(T - T_0)}$$

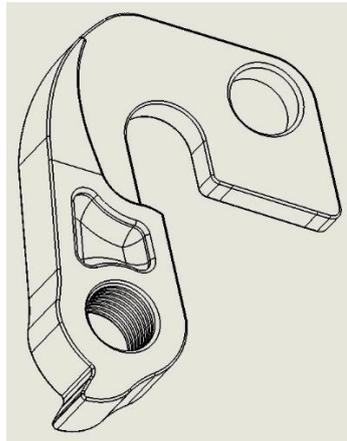
Equação 4 – Máxima deformação de transformação

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{3}{2}} \varepsilon_L$$

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As gancheiras são projetadas de acordo com o quadro da bicicleta em que será instalada, alguns modelos servem para muitos modelos de quadro, já outras servem apenas para um específico. Este trabalho foi baseado no modelo de gancheira utilizado em bicicletas da marca Specialized que está exposto na Figura 8.

Figura 8 - Modelo específico de gancheira.



Fonte: Adaptado de GrabCAD, 2016.

A parte superior, de menor espessura, é a que ficará em contato com o quadro da bicicleta, no furo será inserido um parafuso que fixará o componente. A parte mais espessa é onde será fixado o câmbio através de um parafuso também. O eixo da roda será encaixado na fenda em forma de U da peça. É possível observar na Figura 9 um conjunto quadro, gancheira (em destaque), cambio montado.

Figura 9 - Conjunto quadro, gancheira e câmbio

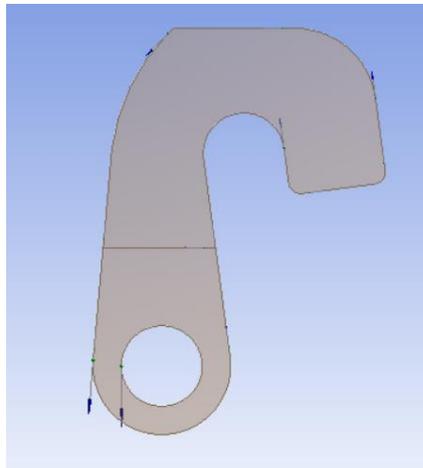


Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.1 MODELO EM CAD

Utilizou-se o software ANSYS 17 Workbench e uma simplificação da geometria da gancheira foi realizada a fim de tornar a simulação mais simples (leve em termos de processamento). As dimensões de uma peça foram extraídas com utilização de um paquímetro e através do DesignModeler, ferramenta de desenho assistido por computador (CAD), criou-se a geometria. Com o contorno da peça criado, gerou-se um corpo de superfície com espessura mínima, a fim de tornar a análise mais leve para o processamento da máquina. A Figura 10 ilustra a geometria elaborada no software.

Figura 10 - Protótipo da gancheira elaborado no DesignModeler



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.2 MODELAGEM DO MATERIAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para simulação do efeito memória de forma, modelou-se uma liga com as propriedades expostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da liga memória de forma

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade Austenita	60 GPa
Módulo de Elasticidade Martensita	60 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Deformação máxima	7,5%
Temperatura de Referência	50°C
Tensão de transformação direita Austenita	450 MPa
Tensão de transformação reversa Austenita	250 MPa
Tensão de transformação direita Martensita	500 MPa
Tensão de transformação reversa Martensita	300 MPa

Fonte: Xavier et. al., 2018.

Com o material já modelado é possível realizar a análise estrutural mecânica e estabelecer as condições de contorno do sistema. Para simular a instalação do componente numa bicicleta, uma de suas superfícies foi dividida por uma linha e a parte que é fixada junto ao quadro da bicicleta foi colocado um suporte fixo. A Figura 11 permite a visualização desta condição de contorno do tipo suporte fixo.

Figura 11 - Suporte fixo inserido na parte em destaque.

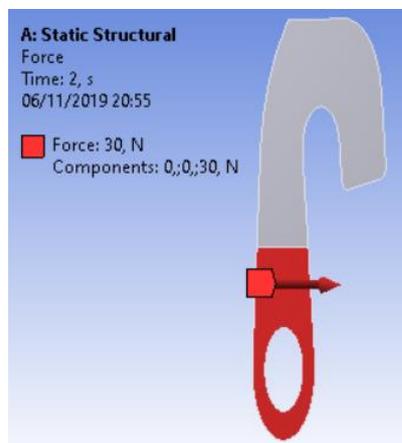


Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Na parte inferior, onde o câmbio é fixado, realizou-se uma força normal a superfície com intensidade de 30N, força de intensidade suficiente para gerar o fenômeno esperado, com intuito de verificar a deformação sofrida pelo dispositivo quando tensões anormais lhe são aplicadas.

A Figura 12 ilustra esta condição de contorno.

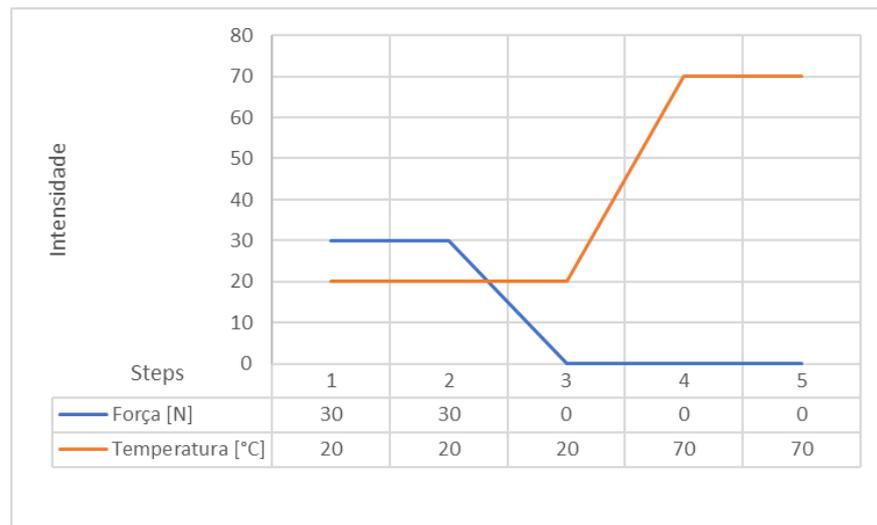
Figura 12 - Esforço submetido ao dispositivo.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Após a aplicação do esforço, uma deformação residual é esperada e, para que o efeito memória de forma ocorra, um aquecimento acima da temperatura crítica é necessário. Deste modo, todo o fenômeno foi dividido em cinco steps, em momentos com aplicação de força e momentos de aquecimento. Foi estabelecido uma quantidade inicial de 100 substeps, sendo 50 a quantidade mínima e 500 a máxima. A sequência dos fenômenos de força e temperatura pode ser observada na Tabela 2.

Gráfico 1 - Força e temperatura ao longo dos steps.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

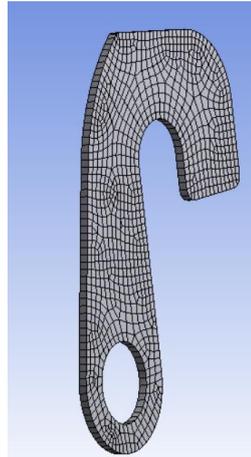
Deste modo, após a remoção do esforço externo, elevou-se temperatura do corpo a 70°C, temperatura esta superior a crítica modelada para liga, fazendo com que o efeito memória de forma ocorra.

Utilizou-se a malha gerada automaticamente pelo programa, visto que esta gerou uma quantidade de elementos e nós de qualidade.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Gerou-se a malha automaticamente através do software obtendo 1024 nós e 913 elementos dos tipos triangulares e quadriláteros. A Figura 13 ilustra a malha gerada pelo software.

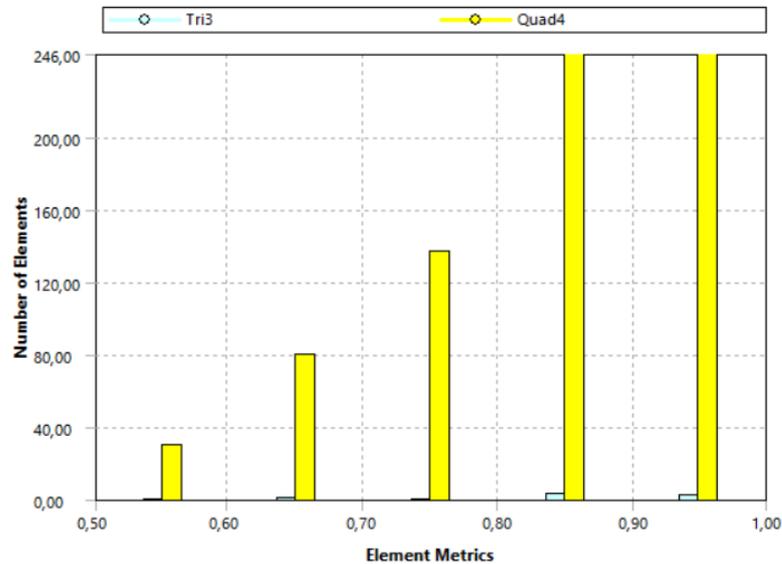
Figura 13 - Malha gerada pelo software.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Verificou-se a qualidade da malha através da ferramenta *Element quality* disponível no software. O valor da qualidade igual a 1 indica uma qualidade de um cubo perfeito, enquanto o valor zero indica um elemento sem volume. O Gráfico 2 indica a qualidade dos elementos da malha.

Gráfico 2 - Qualidade dos elementos.

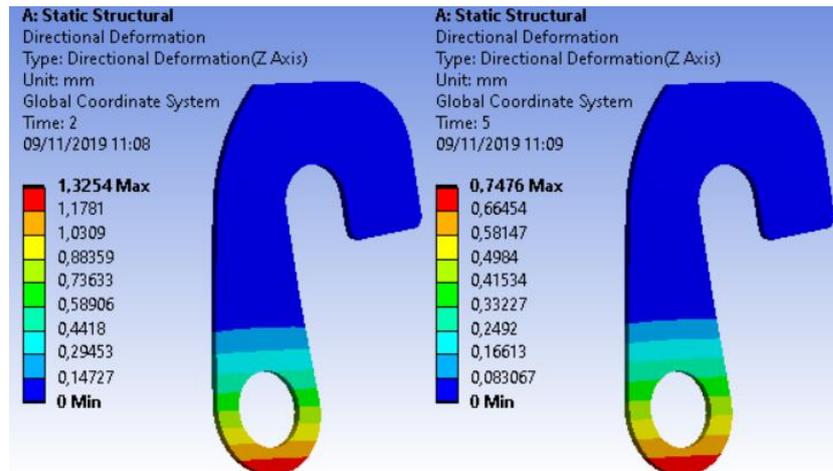


Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A malha foi capaz de gerar elementos com qualidade máxima de 0,99, mínima de 0,50 e um valor de qualidade média de 0,85.

Inicialmente, aplicou-se a força externa sem aquecer o componente, para avaliar a deformação e as tensões residuais após a liberação da carga. A Figura 14 ilustra a deformação no momento de carregamento máximo e após liberação da carga.

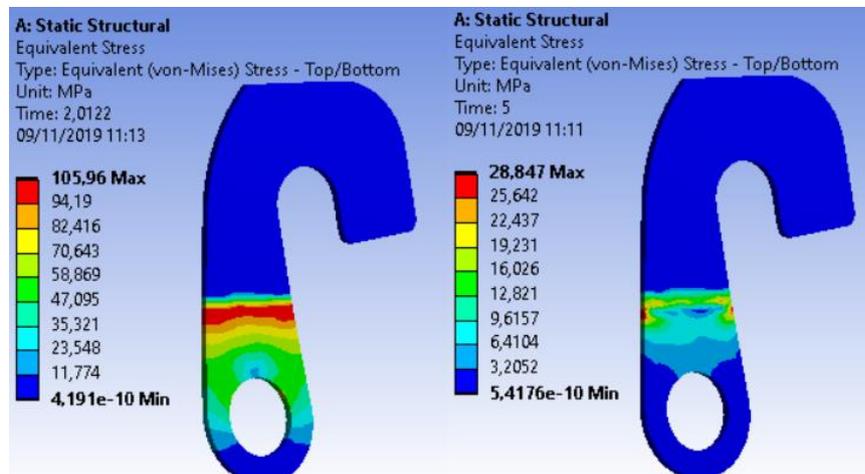
Figura 14 – (A) Deformação no momento da carga máxima. (B) Deformação residual após liberação da carga.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

No momento da carga máxima o corpo apresentou uma deformação máxima pouco maior que 1,3mm e, quando a carga foi liberada, 44% da deformação foi restaurada elasticamente. A Figura 15 é um esquema das tensões residuais quando não há aplicação de temperatura.

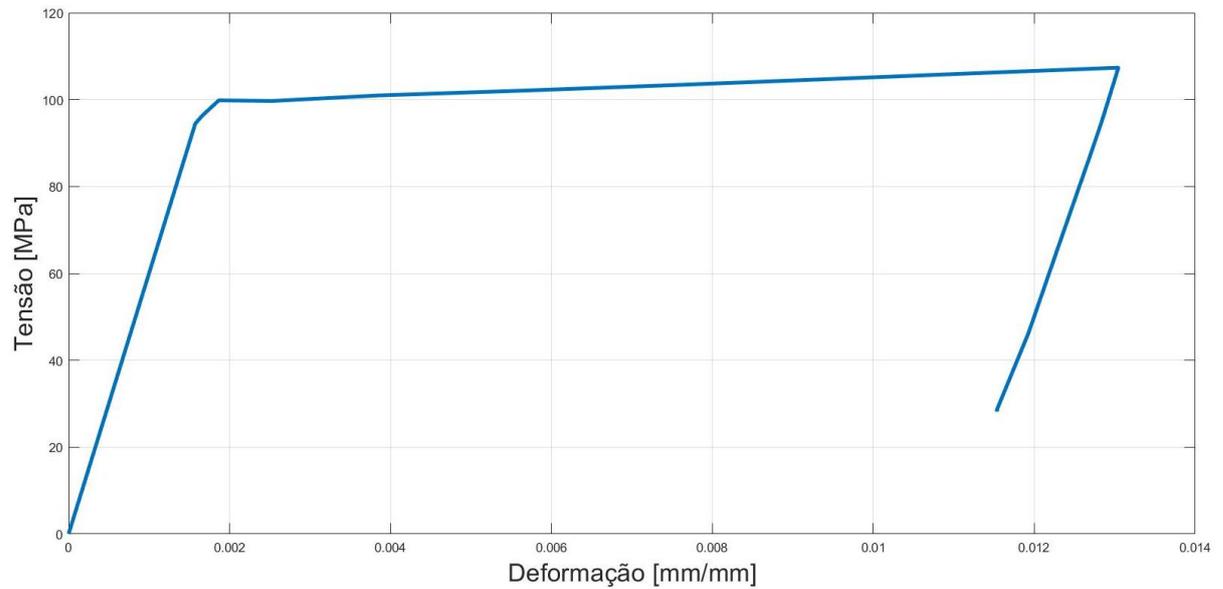
Figura 15 – (A) Tensão de Von-Mises no momento da carga máxima. (B) Tensão de Von-Mises residual após liberação da carga.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

No momento em que a carga é máxima, as tensões ultrapassam 100 MPa próximo à região de onde há a fixação da peça. Após a liberação da carga 28 MPa é tido como tensão residual. O Gráfico 3 mostra a curva tensão deformação do corpo para as condições citadas.

Gráfico 3 - Gráfico tensão deformação sem aumento de temperatura.

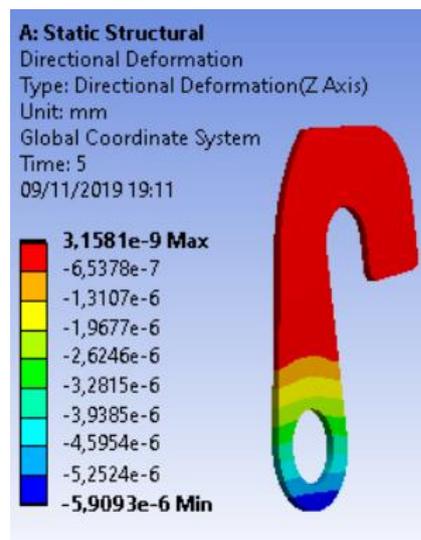


Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A partir do Gráfico 3 é possível perceber que após a liberação da carga houve uma recuperação elástica do material, mesmo assim, gerando uma deformação residual de aproximadamente 1,15%.

Agora um aquecimento foi imposto ao sistema, após a liberação da carga a temperatura foi elevada a 70°C, temperatura esta superior à temperatura crítica do material. Na Figura 16 está ilustrado a deformação residual após o aquecimento.

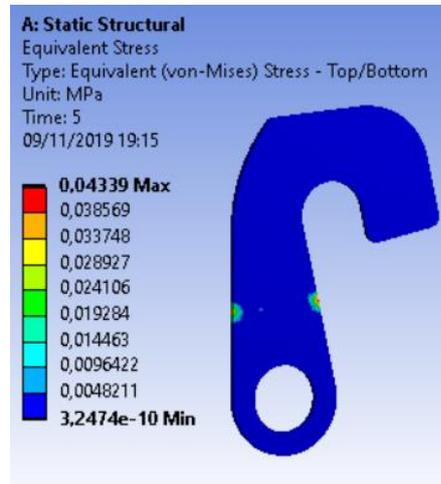
Figura 16 - Deformação residual após aquecimento



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A partir da Figura 16 é possível perceber a eficácia do efeito memória de forma, após o aquecimento a deformação residual foi restaurada a um valor irrisório na ordem de nanômetros. A Figura 17 é um esquema da tensão residual após o aquecimento.

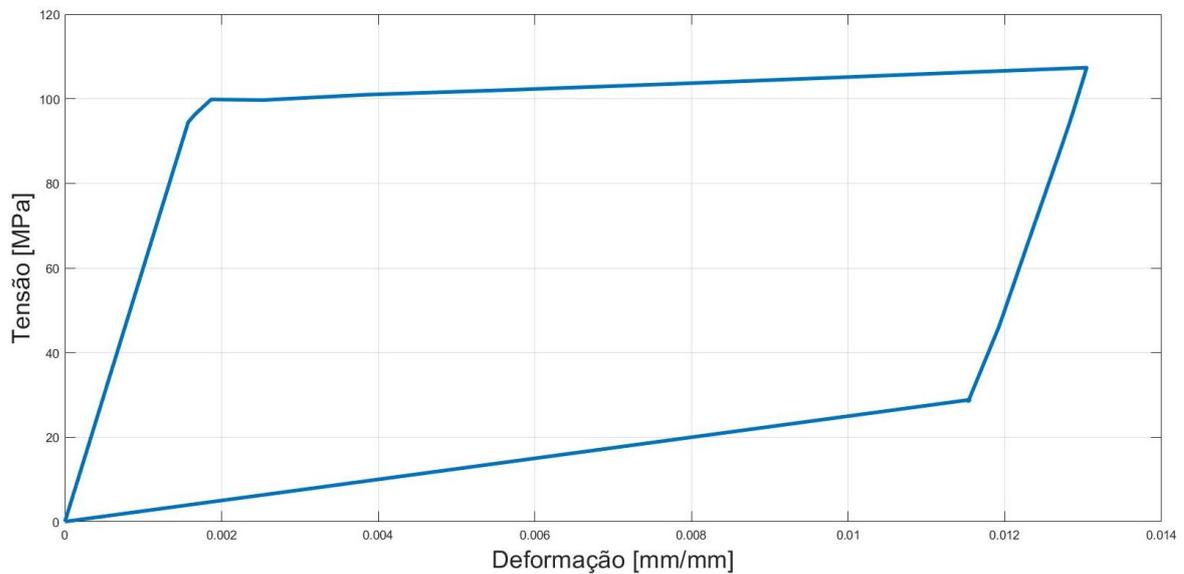
Figura 17 - Tensões residuais após aquecimento.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

O comportamento para a tensão residual é semelhante à deformação. Na região da interface entre as condições de contorno “suporte fixo” e a força externa é onde existe as maiores tensões e maior quantidade de tensão residual. Isto pode ser justificado pois esta transição configura um concentrador de tensão que não existirá em tamanha intensidade em situações reais. O Gráfico 4 mostra a histerese da liga memória de forma, comportamento característico deste tipo de material que valida o seu efeito.

Gráfico 4 - Gráfico tensão deformação com aquecimento.

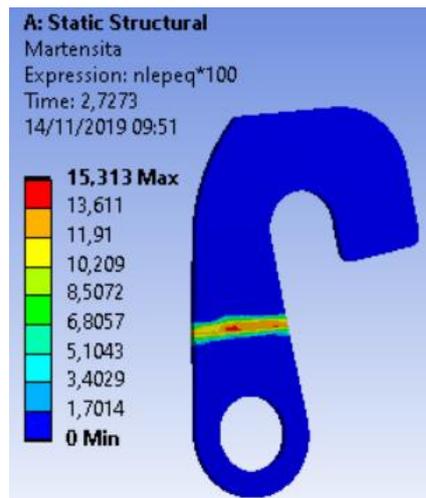


Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Com a aplicação do aquecimento após a liberação da carga, a deformação residual que era de 1,15% agora tem valores irrisórios o que atesta a eficácia do efeito memória de forma.

O efeito memória de forma pode ser mais uma vez validado quando se verifica a martensita gerada com a deformação do corpo. A Figura 18 ilustra a região e quantidade de martensita obtida.

Figura 18 - Martensita gerada com a deformação.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Percebe-se, a partir da Figura 18, um aumento da concentração de martensita a medida que se aproxima da região da deformação, obtendo valores superiores a 15%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos os componentes de bicicleta tiveram um avanço tecnológico expressivo e a aderência de atletas amadores a equipamentos mais sofisticados vem crescendo. Entretanto, percebe-se que com o avanço destas tecnologias a manutenção destes equipamentos se torna cada vez mais complicada e custosa, tirando a segurança do atleta em realizar alguns reparos simples que antes fazia.

As deformações apresentadas na análise numéricas são suficientes para comprometer o bom funcionamento do câmbio da bicicleta, deste modo, será necessário que o processo de desempenho da gancheira seja realizado. Quando este processo é realizado, deformações plásticas são causadas no equipamento fazendo com que tensões residuais existam e uma fragilização ocorra, deste modo, não apresentando a mesma confiabilidade de quando novo.

Com a utilização de uma gancheira em liga memória de forma, basta aquecê-la para que recupere sua forma original, sem esforços mecânicos e sem causar fragilização.

Majoritariamente os atletas de mountain bike vão para locais remotos onde exista o terreno adequado para prática da atividade, deste modo, carregam sempre consigo um kit de reparos para emergências. Caso uma gancheira convencional empene ou, na pior hipótese, quebre, a substituição no local será necessária para ter continuidade na atividade, entretanto, é raro entre os atletas aquele que carrega uma gancheira reserva. Ao se utilizar uma gancheira em liga memória de forma caso esta empene durante a atividade, basta que o atleta tenha consigo um isqueiro e poderá realizar o reparo sem grandes dificuldades e em pouco tempo.

O componente aqui estudado foi cadastrado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) como Patente de modelo de utilidade intitulada “Suporte de câmbio traseiro de bicicleta em liga memória de forma” com o código BR2020170276967.

6 REFERÊNCIAS

- AURICCHIO, F.; CODA, A.; REALI, A. **SMA Numerical Modeling Versus Experimental Results: Parameter Identification and Model Prediction Capabilities.** Journal of Materials Engineering and Performance, n. 5-6, 2009.
- AVENTRILHA. **O artigo definitivo de Mountain bike para iniciantes**, 2017. Disponível em: <<https://www.aventrilha.com.br/artigo-guia-mountain-bike-iniciantes/>>.
- BELLOTO, J. C. A. **Bicicleta: opção para uma mobilidade urbana mais saudável e sustentável.** Monografia (Especialização Serviço Social) – UFPR Litoral, 2009.
- CALLISXTO, V. **As Rodas da Capital: História dos Meios de Transporte.** Editora Junta Distrital de Lisboa, 1967.
- CHEN, X., LIU, Y. **Modeling and Simulation with Ansys Workbench.** LCC, Boca Raton, 2015.
- DOWNS, T. **The Cycling guide to complete bicycle maintenance & repair for road & mountain bikes.** 6 ed.
- ESCOLA DE BICICLETA. **A história da bicicleta no mundo**, 2019. Disponível em <<http://www.escoladabicicleta.com.br/historiadabicicleta.html>>.
- KAUFFMAN, G., MAYO, I. **Memory Metal.** Chen Matters, p. 4-7, October 1993.
- LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys.** Dimitris C ed New York, Springer Science+Business Media, LCC, 2008.
- MADENCI, E., GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®.** 2ed, Springer, New York, 2015.
- MANFIOLETE, L. D., AGUIAR, C. M. **A história da bicicleta e seus usos.** EFDesportes.com, revista digital, Buenos Aires, 2013.
- NARESH, C., BOSE, P. S. C. RAO, C. S. P. **Shape memory alloys: a stat of art review.** IConAMMA 2016:International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Applications 2016. India, 2016.
- OLIVEIRA, A. G. **Concepção e análise dinâmica de sistema com controle de mancal adaptativo incorporando molas LMF.** UFCG. Dissertação de Mestrado. Campina Grande, 2017.
- OLIVEIRA, J. V. L. **Análise numérica e experimental de um anel superelástico de liga com memória de forma de Ni-Ti.** UFPB. Trabalho de conclusão de curso. João Pessoa, 2017.

OLIVEIRA, S. Caracterização e desenvolvimento de um atuador de força utilizando material de memória de forma. UFPB. Dissertação de mestrado. João Pessoa, 2015.

RAO, A., SRINIVASA, A. R., REDDY, J. N. Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators. Springer, New York, 2015.

SILVA, R. S. Análise de estruturas inteligentes com memória de forma utilizando o método dos elementos finitos. UFRJ – Escola Politécnica. Projeto de graduação. Rio de Janeiro, 2016.