

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ITALO VAZ DE SOUZA
MATHEUS FREITAS DA CONCEIÇÃO
VINICIUS TRIVILINI SILVA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM DISPOSITIVO ATIVO DE
ISOLAMENTO TÉRMICO DE TUBULAÇÕES BASEADO EM
MATERIAIS COMPÓSITOS COM MEMÓRIA DE FORMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2021

**ITALO VAZ DE SOUZA
MATHEUS FREITAS DA CONCEIÇÃO
VINICIUS TRIVILINI SILVA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM DISPOSITIVO ATIVO DE
ISOLAMENTO TÉRMICO DE TUBULAÇÕES BASEADO EM
MATERIAIS COMPÓSITOS COM MEMÓRIA DE FORMA**

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: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior

RIO DE JANEIRO

2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S729 Souza, Italo Vaz de

Estudo de viabilidade de um dispositivo ativo de isolamento térmico de tubulações baseado em materiais compósitos com memória de forma / Italo Vaz de Souza, Matheus Freitas da Conceição [e] Vinicius Trivilini Silva. — 2022.

68f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2022.

Bibliografia : f. 64-68

Orientador: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior

1. Engenharia mecânica. 2. Ligas com memória de forma . 3. Ligas de níquel. 4. Ligas de ferro. 5. Método dos elementos finitos. I. Conceição, Matheus Freitas da. II. Silva, Vinicius Trivilini. III. Monteiro Junior, Paulo Cesar da Camara (Orient.). IV. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Gostaria de reconhecer em forma de gratidão, inicialmente, a Deus por ter conseguido dentre muitas lutas, com vitórias e derrotas ter chegado até aqui e dizer que o impossível só existe para quem não sabe o que é ter fé em Deus. Em ação de graças pela conclusão do presente trabalho e por toda graduação deixo aqui esse versículo bíblico na forma de expressar a minha gratidão pelo momento em que vivo: “Consagre ao Senhor tudo o que fez, e os seus planos serão bem-sucedidos” (Josué 1:9).

Dedico também esse trabalho aos meus pais, Jadilson e Eunice, por tudo que conseguiram me prover ao longo da vida e mesmo com tantas dificuldades que transcorreram ao longo desses 25 anos, posso afirmar que recebi a melhor educação do mundo, com muito carinho, amor e zelo – sou muito agradecido pelo que fizeram e fazem por mim, além de serem exemplos tanto para mim quanto ao meu Irmão. Aproveitando, também quero mencionar o meu “atrapalhante favorito”, meu Irmão, Igor Vaz – que desde o seu nascimento me inspira, de forma diária, a ser uma pessoa melhor, mais paciente e compassiva. Também gostaria de retribuir a todos meus familiares pelo suporte e apoio dados ao longo da vida. Queria ressaltar em especial pessoas, que de forma direta, contribuíram bastante para que eu possa estar escrevendo esse agradecimento, são elas: Meu Tio, Edmar; Minha Tia e Madrinha, Elisete; Meu Tio, José Marcos; e a minha falecida vó, Ginalda, que onde estiver, com toda certeza, orgulhosa das nossas conquistas e pela forma que fazemos questão de sempre estarmos juntos e unidos conforme foi ensinado por ela em vida.

Expresso aqui também a minha gratidão aos meus companheiros de trabalho e caminhada, Matheus Conceição e Vinicius Trivilini, por todo empenho e dedicação ao toparem esse projeto. Gostaria de ressaltar, também, outros grandes amigos que ganhei ao longo do curso e que foram essenciais para a minha formação, sendo eles: Vitor Peixoto, Leonardo Ribeiro, Leonardo Rebouças, Lucas Pacheco e Gabriel Monteiro – expresso aqui a minha cortesia aos colegas e mencionar que com união, amizade e fraternidade é possível alcançar objetivos maiores que conseguimos imaginar.

Por fim, quero agradecer especialmente ao nosso orientador, Paulo Camara, que se mostrou uma pessoa extremamente dedicada, receptiva, sempre disposto a nos ajudar, e por aceitar prontamente como pupilos ao longo desses dois semestres e em especial, agradeço também a nossa coorientadora, Luciana Loureiro, por todo suporte no projeto.

Italo Vaz de Souza

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me orientado e ajudado em todos os momentos da minha vida, principalmente nas situações de maior adversidade. Foi acreditar que com ele e através dele tudo é possível, pude chegar até aqui.

Agradeço aos meus avós Francisco e Cléia que mesmo não estando presentes fisicamente fazem parte dessa conquista por terem me criado e me influenciado a ser quem eu sou hoje. Agradeço também a minha mãe, Glória, por ter me dado todo o apoio sentimental e motivacional necessário a longo desses anos, principalmente durante o período de execução do presente trabalho. O mesmo agradecimento eu faço ao meu irmão João Victor por ter estado presente ao meu lado. Agradeço especialmente ao meu padrinho Felipe e meu primo Pedro por terem sido os principais responsáveis pela minha busca por conhecimento e minhas maiores influências em escolher engenharia como curso e profissão. Faço agradecimento as seguintes pessoas que direta ou indiretamente me influenciaram, deram suporte ou me toleraram nos momentos mais complicados sendo elas: Anderson, Gustavo, Jéssica, João, Marcelo, Pedro, Juliana, Alan, Jean, Andressa, Elianice, Keicce e Sarah.

Agradeço imensamente aos meus companheiros de trabalho Italo Vaz e Vinicius Trivilini por terem compartilhado essa experiência e por toda dedicação ao projeto. Em especial agradeço ao meu amigo Wallace por ter doado seu tempo e conhecimento em nos ajudar. Deixo meus agradecimentos aos amigos CEFET me deu entre eles: Maria Cristina, Raphael Henrique, Daniel Gualandi, João Vitor e Larissa Pinheiro.

Agradeço ao nosso orientador Paulo Camara pelos ensinamentos e conselhos durante todo o progresso do trabalho, pela sua presença e dedicação em nos direcionar e ajudar.

Matheus Freitas da Conceição

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a minha mãe Renata, minha maior referência, por sempre ter batalhado para me prover as melhores oportunidades que ela conseguiu, além de sempre ter apoiado as minhas decisões, estando comigo nos momentos mais importantes da minha vida e ao meu pai João por todo o esforço e apoio durante a minha jornada.

Agradeço, e dedico este trabalho, à minha avó Maria e ao meu avô José, que tiveram papéis fundamentais na minha educação, além de nunca medirem esforços para estarem ao meu lado me apoiando. Além disso, dedico à minha avó Francisca por todo o carinho e preocupação que sempre demonstrou por mim. Também agradeço a todos os outros membros da minha família, que de alguma forma me ajudaram durante essa caminhada, em especial minha tia Vivian, que sempre me apoiou e torceu em prol do meu desenvolvimento, e ao meu padrasto Caetano, que exerceu um papel importante de apoio durante a minha caminhada na faculdade.

Agradeço também a minha namorada, Dandara, que sempre esteve ao meu lado, celebrando os momentos de vitória e me apoiando nos momentos de derrotas ao longo do curso de engenharia mecânica. Sem o amor e o carinho dela, a trajetória até aqui teria sido muito mais difícil e, por isso, sou muito grato por tê-la em minha vida.

Além disso, agradeço a todos os meus amigos do CEFET/RJ, pois cada um me ajudou nessa jornada do seu jeito, especificamente meus parceiros neste trabalho, Italo Vaz e Matheus Freitas, que tornaram a realização deste trabalho inesquecível. Incluo também meus amigos Raphael Henrique, Daniel Gualandi, João Vitor e Larissa Pinheiro, que compartilharam comigo todos os desafios da faculdade do primeiro período até aqui.

Por fim, gostaria de agradecer especialmente ao nosso orientador, Paulo Camara, que aceitou o desafio de nos auxiliar durante dois períodos, transmitindo conhecimentos de áreas pouca conhecidas por nós, além de apresentar uma ótima disponibilidade e paciência em nos ajudar.

Vinicius Trivilini Silva

RESUMO

SOUZA, Italo. CONCEIÇÃO, Matheus. SILVA, Vinicius. Estudo de Viabilidade de um Dispositivo Ativo de Isolamento Térmico de Tubulações Baseado em Materiais Compósitos com Memória de Forma. 2022. 59 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2022.

As ligas com memória de forma são a um grupo de materiais metálicos que têm habilidade de retornar ao seu formato ou tamanho previamente estabelecidos quando submetidas a um ciclo termomecânico adequado. Dentre suas várias aplicações, destaca-se a proposta deste trabalho em estudar a viabilidade do uso de uma manta isolante para tubulações submersas com fios de material que se baseiam no efeito de memória de forma por tensão assistida. O material escolhido que dá o efeito de memória de forma é uma Liga Níquel-Titânio, em que o presente trabalho denota a importância da liga no contexto atual e as suas aplicações. Sendo assim, foi desenvolvido um modelo numérico utilizando o método de elementos finitos capaz de simular o comportamento deste material dentro do software Ansys. No que tange o comportamento do material, o estudo proposto mostra também a validação do modelo como um todo, uma análise dos resultados em relação às tensões a partir de deslocamentos prescritos e do comportamento com temperaturas intermediárias que o material possa estar sujeito. Foi possível concluir que com a borracha de Neoprene, material selecionado para servir como isolante térmico, o fio de memória de forma, servindo como reforço nessa matriz, é capaz de recuperar a deformação imposta pelo deslocamento prescrito através de seu aquecimento.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Elementos Finitos, Ligas Níquel-Titânio, Materiais Metálicos.

ABSTRACT

SOUZA, Ítalo. CONCEIÇÃO, Matheus. SILVA, Vinicius. Viability Study of an Active Pipe Thermal Insulation Device Based on Shape Memory Composite Materials. 2022. 59 pages. Trabalho de Conclusão de Curso – Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2022.

Shape memory alloys correspond to a group of metallic materials that having the ability to return to their shape or actual size when subjected to a suitable thermal cycle. Among these various applications, the proposal of this report stands out in the studying the availability of using an insulation mat for submerged pipes with are based on the shape memory effect by assisted tension. the material which gives the shape memory effect is a Nickel-Titanium Alloy, the present work shows the importance of these alloy in the current context and its applications. Therefore, a numerical model was developed using the finite element model able of simulating the behavior of this material through the software called Ansys. About the behavior of the material. the report also shows the validation of the model as a whole, an analysis of the results in relation to stresses from prescribed displacements and the behavior at intermediate temperatures to which the material is exposed. It was possible to conclude that with Neoprene rubber, a material selected to serve as a thermal insulator, the shape memory wire, serving as a reinforcement in this matrix, is able to recover the deformation imposed by the prescribed displacement through heating.

Keywords: Shape Memory Alloys, Finite Elements, Nickel-Titanium Alloys and Metallic Materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da curva típica de transformação de uma liga com memória de forma. Adaptado de Gonzalez et al. (1993).....	16
Figura 2 - Transformação de fases nas ligas com memória de forma. Adaptado de Lagoudas et al. (2008).	18
Figura 3 - Transformação de fase induzida por temperatura de três amostras σ_1 , σ_2 e σ_3 . Adaptado de Lagoudas et al. (2008).	19
Figura 4 - Gráfico deformação x temperatura de três amostras de tensões, σ_1 , σ_2 e σ_3 . (LAGOUDAS. 2008).	19
Figura 5 - Gráfico tensão x deformação para o NiTi superelástico, aço inoxidável, osso e tendão. Adaptado de Morgan et al. (2004).	20
Figura 6 - Caso Clínico; reconstrução de tomografia computadorizada com ênfase no arcabouço ósseo torácico demonstrando múltiplas osteossínteses costais, fixadas por grampo de Judet. (VILLARINHO, 2010).	21
Figura 7 - Stent, Nitinol. (MORGAN, 2004)	22
Figura 8 - Comparação do comportamento mecânico do Nitinol em relação a alguns tecidos do corpo humano (DUERIG; PELTON, 1999).....	23
Figura 9 - Curva deformação x temperatura para dois ciclos térmicos com tensões diferentes.....	29
Figura 10 - Geometria SOLID186. Fonte: ANSYS, 2021.	32
Figura 11 - Diagrama de Carregamento Termomecânico. Fonte própria.	33
Figura 12 - Geometria do Fio.....	34
Figura 13 - Fio SMA Condições de Contorno.	34
Figura 14 - Convergência de Malha para o fio. Fonte: Própria.....	35
Figura 15 - Representação da malha. Fonte: Própria	36
Figura 16 - Fração Volumétrica de Martensita. Fonte: Própria.	36
Figura 17 - Validação Numérico Experimental do fio. Fonte: Própria.	37
Figura 18 - Esquematização manta térmica. Fonte: Projeto FAPERJ (MONTEIRO, 2019).....	38
Figura 19 - Geometria do fio em formato “C”.....	39
Figura 20 - Resultado comparativo da tensão equivalente de Von-Mises (a) engaste e (b) pivotamento. Fonte: Própria.	40
Figura 21 - Condições de Contorno do formato “C”. Fonte: Própria.....	41
Figura 22 - Convergência de malha do formato “C”. Fonte: Própria.....	41
Figura 23 - Representação da malha do formato “C”. Fonte: Própria.	42

Figura 24 - Curva Deformação x Temperatura formato “C”. Fonte: Própria.	43
Figura 25 - Comparação da deformação fio x arco e influência da temperatura na recuperação. Fonte: Própria.	44
Figura 26 - Comparação da fração martensítica fio x arco. Fonte: Própria.	45
Figura 27 – Influência da temperatura na recuperação da deformação para fio SMA em formato “C”. Fonte: Própria.	46
Figura 28 - Manta térmica de Neoprene com reforça de fio SMA. Fonte: Própria.	47
Figura 29 - Gráfico de Deformação e Fração martensítica em função do tempo de simulação. Fonte: Própria.	48
Figura 30 - Tensão máxima para manta com reforço SMA com $d = 2$ mm. Fonte: Própria.	48
Figura 31 – Deformação recuperada para arco inserido em matriz de material hiperelástico. Fonte: Própria.	49
Figura 32 – Comparação da deformação máxima em função do tempo para arco com acoplamento e sem. Fonte: Própria.	50
Figura 33 - Comparação da fração martensítica em função do tempo para arco com acoplamento e sem. Fonte: Própria.	51
Figura 34 - Gráfico de Deformação e Fração martensítica em função do tempo de simulação para fio de 1 mm de diâmetro. Fonte: Própria.	52
Figura 35 - Tensão máxima para manta com reforço SMA com $d = 1$ mm. Fonte: Própria.	52
Figura 36 – Comparação da deformação máxima e recuperável para manta com variação do diâmetro do reforço. Fonte: Própria.	53
Figura 37 - Comparação da fração martensítica para manta com variação do diâmetro do reforço. Fonte: Própria.	53
Figura 38 - Curva tensão x deformação x temperatura a 50 °C. Fonte Própria.	56
Figura 39 - Curva tensão x deformação x temperatura a 70 °C. Fonte Própria.	57
Figura 40 - Curva tensão x deformação x temperatura a 100 °C. Fonte Própria.	58
Figura 41 - Curva deformação x tempo x temperatura a 50 °C. Fonte Própria.	59
Figura 42 - Curva deformação x tempo x temperatura a 70 °C. Fonte Própria.	59
Figura 43 - Curva deformação x tempo x temperatura a 100 °C. Fonte Própria.	60
Figura 44 - Gráfico Tensão x Fração Martensítica x Temperatura (50°C). Fonte Própria.	61
Figura 45 - Gráfico Tensão x Fração Martensítica x Temperatura (70°C). Fonte Própria.	62
Figura 46 - Gráfico Tensão x Fração Martensítica x Temperatura (100°C). Fonte Própria.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre algumas propriedades das ligas NiTi e do aço inoxidável austenítico. Adaptado de Desroches et al. (2004) e Johnson Matthey Medical Componentes (2016).....	24
Tabela 2 – Parâmetros do Modelo do ANSYS. Fonte: Própria.....	28
Tabela 3 - Parâmetros de simulação ANSYS.....	32
Tabela 4 - Propriedades Elásticas da Austenita.....	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1.	MOTIVAÇÃO	12
1.2.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2	LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	14
2.1.	TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS	15
2.2.	COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS SMAs	17
2.3.	EFEITO DE TENSÃO ASSISTIDA	18
2.4.	APLICAÇÕES DAS LIGAS NiTi	20
3	MODELO CONSTITUTIVO	25
3.1.	MODELO CONSTITUTIVO PARA MODELAGEM DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	25
3.1.1.	Descrição dos Parâmetros do Modelo	28
4	COMPARAÇÃO NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE ENSAIO DE TRAÇÃO	31
4.1.	ENSAIO DE TRAÇÃO	31
4.2.	SIMULAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO	31
4.2.1.	Geometria do Fio e Condições de Contorno	33
4.2.2.	Convergência de Malha	35
4.2.3.	Validação Numérico Experimental	37
5	DISPOSITIVO DA MANTA TÉRMICA	38
5.1.	ARCO DE MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA	38
5.1.1.	Geometria do Arco	39
5.1.2.	Condições de Contorno	40
5.1.3.	Convergência de Malha	41
5.1.4.	Comparação Numérico Experimental do Ensaio de Flexão	42
5.1.5.	Comparação do modelo em função da geometria: Fio x Arco	43
5.2.	MANTA DE MATERIAL HIPERELÁSTICO	46
5.2.1.	Comparação da resposta do modelo: arco sem acoplamento em matriz x com acoplamento	49
5.2.2.	Comparação da Manta com Variação do Diâmetro do Reforço SMA	51
6	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	55
6.1.	TENSÃO X DEFORMAÇÃO X TEMPERATURA	55
6.2.	DEFORMAÇÃO X TEMPO X TEMPERATURA	58
6.3.	TENSÃO X FRAÇÃO MARTENSÍTICA X TEMPERATURA	60
7	CONCLUSÃO	63
8	BIBLIOGRAFIA	65

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, no Brasil, houve um grande crescimento na produção de hidrocarbonetos (óleo e gás) impulsionado pela alta dos preços internacionais dessa *commodity*. Verifica-se que a produção nacional, é em sua maioria oriunda de campos *offshore*, e tende cada vez mais, para ambientes de águas profundas e ultra-profundas (Pré-sal). Esses fatos geram a necessidade da implementação de práticas que permitam manter a produção e transporte de hidrocarbonetos de modo contínuo evitando problemas em seu transporte dos campos até as plataformas (*flowlines*).

Uma questão importante na indústria de óleo e gás é a garantia de escoamento, termo que foi batizado por engenheiros da Petrobras na década de 1990. Este trabalho tem como objetivo estudar e desenvolver tecnologias que possam garantir melhora no escoamento de hidrocarbonetos mesmo em condições adversas como baixas temperaturas e baixas pressões. As baixas temperaturas têm uma influência considerável no escoamento de óleo e gás, pois podem causar bloqueios de hidratos em dutos de gás e parafina em dutos de óleo (CHAGAS, 2016).

Uma forma de reduzir o impacto das baixas temperaturas em dutos submarinos em contato com água do mar (cerca de 4°C no fundo) é a utilização de materiais isolantes ou através de aquecimento ativo (efeito Joule). Muitos dutos de última geração já possuem sistemas de aquecimento ativo, mas para dutos antigos que já foram instalados é necessário além de desenvolver materiais de isolamento, criar técnicas viáveis de instalação de baixo custo.

1.1. MOTIVAÇÃO

Uma vez exposto o problema recorrente de resfriamento dos dutos submarinos por contato com a água do mar, o projeto propõe um estudo de viabilidade técnica de utilização de mantas isolantes feitas de materiais compósitos (espuma com reforço de níquel-titânio) que podem ser instaladas em tubulações no fundo do mar. Para tanto, será desenvolvido um modelo numérico em elementos finitos utilizando o software comercial ANSYS® capaz de simular o comportamento do dispositivo - manta compósita (MONTEIRO, 2017). Dessa forma será possível utilizá-lo diminuindo os custos de instalação e solucionando o problema para linhas de transporte antigas.

Segundos dados do Ministério de Minas e Energia no Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, hoje, a produção brasileira é de 3,2 milhões de barris por dia e a previsão para o ano de 2029 é ter uma produção diária de 5,5 milhões de barris. Com base no Anuário estatístico de 2021 da Agência Nacional de Petróleo, em 2020, o Brasil contava com 564 dutos que foram destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e constituindo uma linha de transmissão de 20 mil quilômetros em operação.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído de 7 capítulos, onde o primeiro capítulo aborda as motivações, justificativas e objetivos a serem alcançados com a pesquisa. No tópico seguinte, o segundo capítulo, será exposta a revisão bibliográfica – que traz uma abordagem dos trabalhos sobre os conceitos de memória de forma e os avanços que ocorreram nas pesquisas, ao longo das últimas décadas.

No terceiro capítulo será abordado o modelo constitutivo utilizado para desenvolvimento do modelo numérico, voltado para materiais com efeito de memória de forma, além da descrição de todos os parâmetros necessários.

No quarto capítulo será realizada a validação numérico-experimental através de um ensaio de tração, onde será descrita a geometria e a metodologia seguida para a calibração do modelo.

No quinto capítulo, serão apresentados estudos da manta térmica de isolamento passivo desenvolvida pensando em um protótipo de tubulação de 2 polegadas com o intuito de serem analisados os efeitos termomecânicos da liga de memória de forma com o formato de arco.

No sexto capítulo, serão apresentadas análises referentes aos resultados obtidos em relação à tensão x deformação x temperatura, deformação x tempo x temperatura e, por fim, tensão x fração martensítica x temperatura nas 3 geometrias selecionadas durante o estudo.

No sétimo capítulo são apresentadas as principais conclusões acerca dos resultados apresentados. E por fim, no oitavo capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas que pautam a pesquisa.

2 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Neste capítulo serão discutidas as características das ligas com memória de forma, desde suas primeiras descobertas na década de 1930. Nesta década, os cientistas Greninger da Universidade de Harvard e Mooradian do MIT observaram que a transformação martensítica é resultado de um movimento coordenado entre os átomos na estrutura cristalina, sendo esta a responsável pelos efeitos de memória de forma e pseudoelasticidade. Esse fato foi observado pelo químico sueco Arne Olander em 1938. A memória de forma, efeito observado primeiramente no bronze, pode ser provocado por tensões mecânicas que produzem deformações aparentemente permanentes, no entanto, após o aquecimento retorna a sua forma original. A memória de forma, efeito observado primeiramente no bronze, pode ser provocado por tensões mecânicas que produzem deformações aparentemente permanentes, no entanto, após o aquecimento retorna à sua forma original (OTSUKA & WAYMAN, 1998; RYHANEN, 1999).

Materiais inteligentes são aqueles capazes de receber estímulos do meio ambiente e reagir de maneira pré-configurada (TANI, TAKAGI, QIU et al., 1998). Atualmente, devido às propriedades físicas e mecânicas desses materiais, pesquisas e projetos acabam exigindo grandes investimentos e pode-se afirmar que as áreas médica e industrial têm se interessado de forma expressiva em relação a suas diversas aplicações (TANI, TAKAGI, QIU et al., 1998). Dentre esses materiais, pode-se destacar as ligas com efeito de memória de forma, também conhecida como *Shape Memory Alloy* (SMA). Quando deformadas em baixas temperaturas (fase martensítica induzida por temperatura - maclada), sua estrutura cristalina sofre uma mudança de variante (fase martensítica induzida por tensão - não maclada). Ao aquecer o material ocorre a transformação de fase de martensita para austenita e o material retorna à sua forma original de acordo com a temperatura de operação (STOECKEL, 1989).

As ligas NiTi, também chamadas de Nitinol pela sigla *Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory*, são um dos materiais que apresentam melhor desempenho de efeito de memória de forma (KAUFFMAN, MAYO et al., 1997). Pesquisas sobre este material têm se fortalecido desde a década de 1960 quando o conceito de memória de forma foi estabelecido (KAUFFMAN, MAYO et al., 1997). Desde então, uma das grandes descobertas foi que o Nitinol possui uma taxa de recuperação de forma de até 8% após deformação para uma faixa de temperatura entre -50°C e 110°C (STOECKEL, 1989). Além disso, possui boa biocompatibilidade – habilidade de um material em ser compatível com tecidos vivos – e é fácil

de se deformar em baixas temperaturas, além de possuir forte resistência à corrosão (STOECKEL, 1989). Comparado com outras ligas com memória de forma, que geralmente são compostas de cobre ou de metais nobres como ouro (Au), prata (Ag) e platina (Pt), o Nitinol surge como uma opção de custo consideravelmente baixo (MORGAN, 2004).

Devido a essas características, as ligas de níquel-titânio possuem diversas aplicações comerciais, principalmente na área da saúde (REIS, 2001). Dentre as possíveis aplicações como biomateriais, pode-se citar os implantes ortodônticos, dispositivos para desobstrução de artérias – *stents* – e materiais para inserção de cateteres. No ramo da engenharia, este material é comumente utilizado em acoplamentos, equipamentos elétricos, componentes magnéticos, antenas de satélites e, até flaps de asas de aeronave. (OTSUKA & REN, 2005).

2.1. TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS

A transformação martensítica é considerada o mecanismo que produz o efeito de memória de forma, ou no inglês, *Shape Memory Effect (SME)* junto à recuperação do material, sendo que a recuperação pode ocorrer por meio da aplicação de temperatura e a transformação de austenita para martensita por meio de tensões mecânicas (BEZERRA, 2018).

Dessa forma, a transformação martensítica pode ser considerada como uma transformação estrutural primária que ocasiona deformação uniforme na rede cristalina. Este processo ocorre basicamente por cisalhamento, possibilitado por um mecanismo de impregnação abaixo de sua temperatura de transição. Tal deformação é reversível a partir do momento em que a fase induzida por tensão se transforma em austenita a partir do aquecimento (FERNANDES, 2003). Pode-se afirmar que a transformação martensítica é termoelástica, quando a deformação, responsável por ocasionar a transformação, é absorvida pela matriz austenita, ao redor da martensita, de modo que ocorra um equilíbrio termoelástico entre a energia de origem química e a de origem elástica, que por sua vez, controle o avanço da transformação (MARTINEZ, 2001).

Para identificar o tipo de comportamento que ligas com SME apresentam quando solicitadas, foram definidas quatro temperaturas características e a influência dessas, devido às propriedades termomecânicas desses materiais, é de extrema importância. Várias técnicas podem ser usadas para calcular essas temperaturas, como calorimetria diferencial (DSC), alterações de resistência elétrica etc. (GONZALEZ, 1993).

Na Figura 1, pode-se observar uma curva típica de caracterização térmica para um liga com memória de forma. As temperaturas críticas representadas são denominadas:

- M_s – Temperatura de início de transformação direta: austenita – martensita;
- M_f – Temperatura de término da transformação direta: austenita – martensita;
- A_s – Temperatura de início da transformação reversa: martensita – austenita;
- A_f – Temperatura de término da transformação reversa: martensita – austenita.

Além disso, a partir da Figura 1 temos os seguintes índices representados:

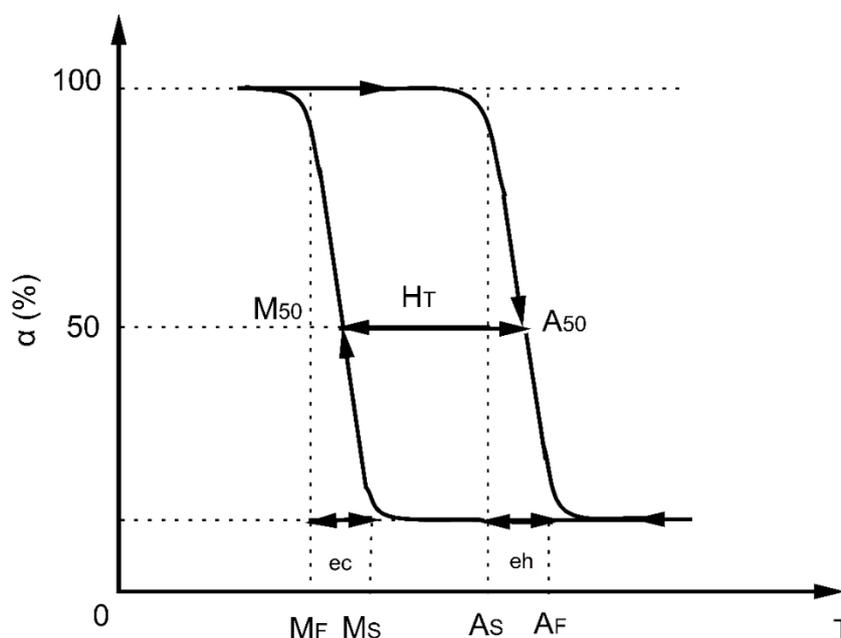


Figura 1 - Esquema da curva típica de transformação de uma liga com memória de forma. Adaptado de Gonzalez et al. (1993).

- α – Fração da martensita transformada;
- M_{50} – Temperatura a 50% da fração de martensita transformada;
- A_{50} – Temperatura a 50% da transformação austenítica;
- H_T – Histerese térmica de transformação ($H_T = A_{50} - M_{50}$);
- eC – Amplitude térmica de resfriamento ($eC = M_f - M_s$);
- eH – Amplitude térmica de aquecimento ($eH = A_f - A_s$).

2.2. COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DAS SMAs

Ligas com memória de forma têm propriedades termomecânicas, que por sua vez estão diretamente relacionadas à temperatura em que se encontram. Portanto, as ligas de NiTi possuem três tipos de comportamento, os quais estão relacionados à faixa de temperatura do material, são eles: quasiplasticidade, pseudoelasticidade e efeito de memória de forma (ROGERS, 1993).

A quasiplasticidade é considerada um fenômeno observado em temperaturas abaixo de M_f , observada na Figura 1. Nesta temperatura a liga com memória de forma está na fase martensítica que é composta de variantes com orientações diferentes. Quando a formação de martensita é induzida termicamente, ocorre uma reorientação da martensita, que por sua vez, ocasiona deformação residual da liga (KRISHNAN et al., 1974).

Em temperaturas acima da temperatura em que a austenita é estável, a liga apresenta o fenômeno de pseudoelasticidade, também conhecido como superelasticidade (KRISHNAN et al., 1974). Quando solicitado a partir de uma tensão, a liga inicia um processo de mudança de fase, de forma gradual, para a sua fase martensítica. Após o término desta solicitação, a fase martensítica deixa de ser estável, ocasionando uma transformação inversa à anterior, o que por sua vez, faz com que o material retorne à sua forma inicial (DESROCHES, 2003; SMITH, 2003).

O efeito de memória de forma, por fim, corresponde à recuperação quasiplástica com carregamentos térmicos de aquecimento (FERNANDES, 2003). Além disso, trata-se da capacidade da liga memorizar sua forma que fora pré-configurada, independentemente da quantidade de deformações sofridas ao longo do tempo (OLSON, COHEN, 1982). Este efeito ocorre quando a liga com memória de forma se apresenta na fase martensita maclada e, além disso, é submetida a deformações com temperaturas abaixo da M_f . (LAGOUDAS, 2008).

Martensita maclada ou *twinned* é formada apenas pela mudança de temperatura. Além disso, esse tipo de martensita é uma forma cristalina latente, que por sua vez depende da tensão aplicada a ela. Nesse estágio, a martensita maclada apresenta cerca de 24 subtipos cristalográficos alternativos (DELAHEY et al., 1974). Porém, quando a martensita é induzida por tensão mecânica, estes 24 subtipos se redirecionam para uma direção mais favorável à tensão aplicada, fato que pode ser observado na Figura 2 (DELAHEY et al., 1974).

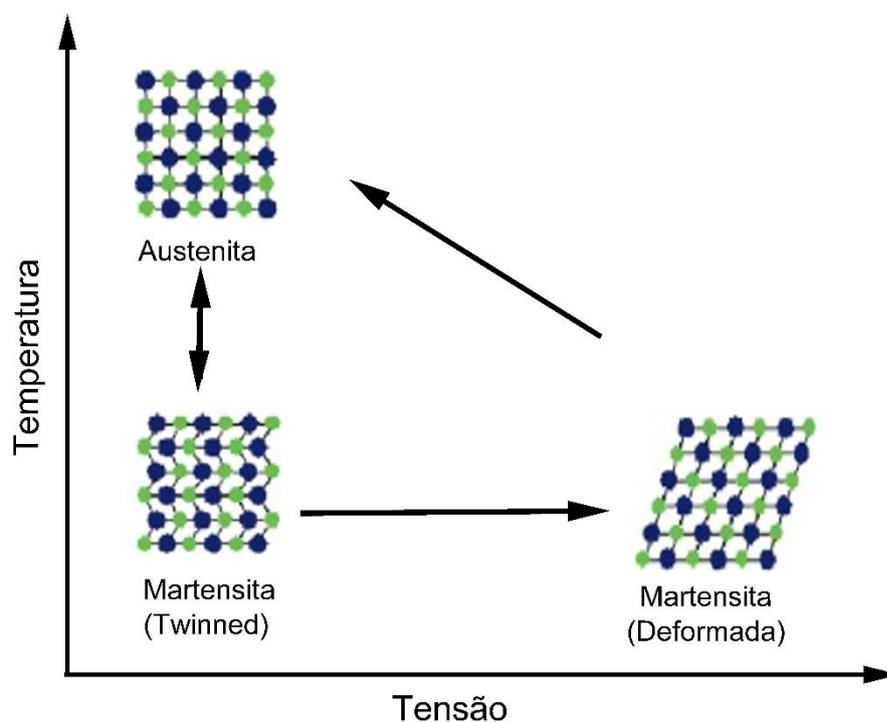


Figura 2 - Transformação de fases nas ligas com memória de forma. Adaptado de Lagoudas et al. (2008).

Por outro lado, em casos em que a martensita é induzida por tensão mecânica ou pelo conjunto de tensão mecânica e aquecimento, forma-se a martensita não maclada, demaclada ou *detwinned*, que por sua vez, apresenta uma forma cristalina ligada ao tipo de tensão a que foi submetida (DELAEY et al., 1974).

2.3. EFEITO DE TENSÃO ASSISTIDA

Ligas com memória de forma possuem um comportamento denominado efeito de memória de forma com tensão assistida, também conhecida como *Stress Assisted Two Way Memory Effect (SATWME)*, que por sua vez, corresponde à deformação causada por uma tensão mecânica mantida durante processos de aquecimento e resfriamento do material, podendo estar sob ação de uma tensão constante ou variável (LAGOUDAS, 2008). Vale salientar que esse será o efeito utilizado em nosso trabalho

A partir da Figura 3, é possível observar a transformação de fase ocasionada pela temperatura e com a presença de três tensões aplicadas ao material, sendo elas: σ_1 , σ_2 e σ_3 constantes.

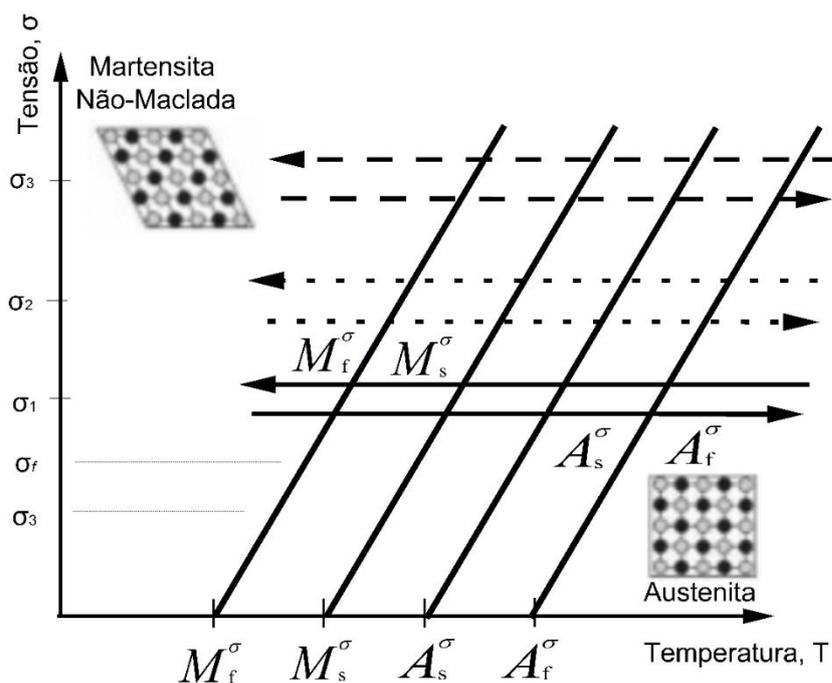


Figura 3 - Transformação de fase induzida por temperatura de três amostras σ^1 , σ^2 e σ^3 . Adaptado de Lagoudas et al. (2008).

Além disso, pode-se afirmar que a tensão está diretamente relacionada com a temperatura aplicada, como demonstra a Figura 4 de deformação por temperatura para cada tensão aplicada (MONTEIRO et al., 2016).

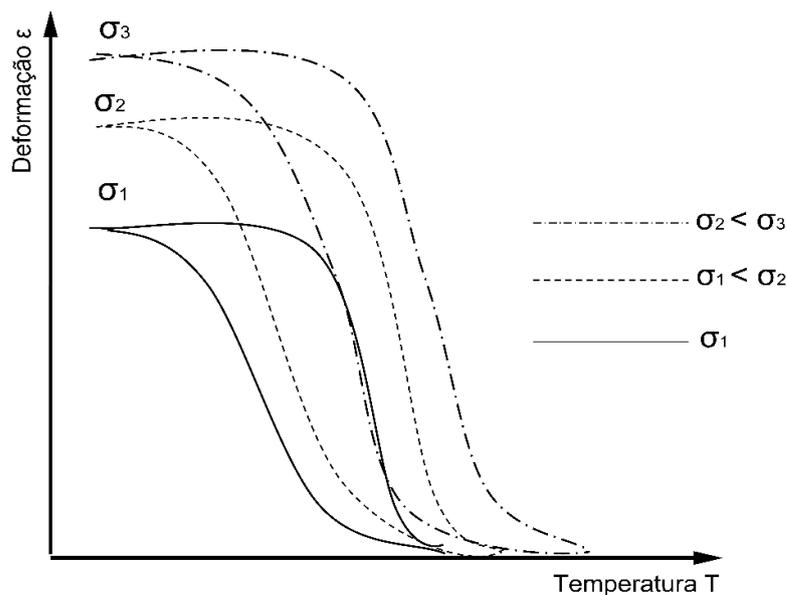


Figura 4 - Gráfico deformação x temperatura de três amostras de tensões, σ^1 , σ^2 e σ^3 . (LAGOUDAS. 2008).

2.4. APLICAÇÕES DAS LIGAS NiTi

O primeiro registro de aplicação em larga escala de uma liga NiTi ocorreu no ano de 1971 e se tratou de uma conexão da junta de uma mangueira hidráulica de titânio da aeronave Grumman F-14 (MELTON, 1998). Desde então, as aplicações dessas ligas se expandiram em diversos objetos e sistemas, são eles: armações de óculos, antenas, controles de vibração em estruturas adaptativas, sistemas robóticos, atuadores térmicos, luvas de conexão de tubos, conectores elétricos, flaps de asas de aeronaves, amortecedores utilizados em construções civis etc. (CASTILHO & SILVA, 2011; OTSUKA & SHIMIZU, 1986; OTSUKA & WAYMAN, 1998; URBINA et al., 2009).

Já a partir de década de 1980, começaram a crescer as aplicações na área de ortodontia e biomedicina, que por sua vez, são áreas consideradas mais adequadas para as ligas NiTi. Isto ocorre, pois, essas ligas apresentam boa resistência à corrosão, boa biocompatibilidade e biofuncionalidade que são características quase inexistentes em materiais cerâmicos, materiais convencionais e outras ligas. É importante destacar que a biocompatibilidade se trata da capacidade de um material em não produzir subprodutos tóxicos para o corpo humano durante o processo de implantação e a biofuncionalidade corresponde à capacidade de um material biológico em realizar as funções necessárias e manter suas características durante o tempo esperado (MIYAZAKI, 1998). A Figura 5 ilustra, de forma esquemática, como as propriedades mecânicas das ligas de NiTi são próximas das propriedades mecânicas de ossos e tendões.

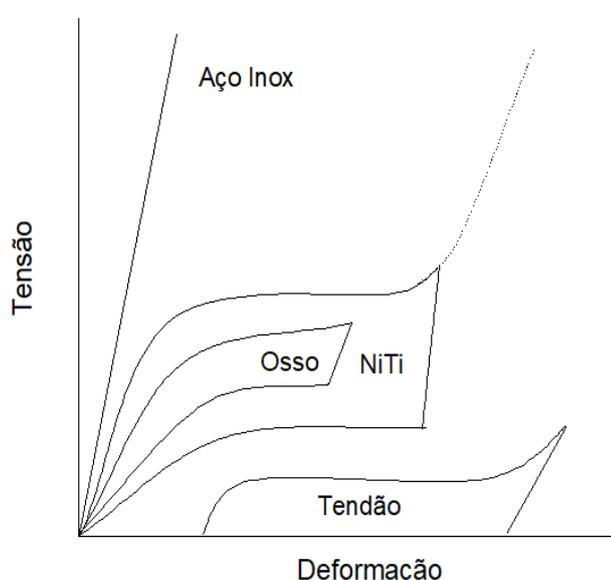


Figura 5 - Gráfico tensão x deformação para o NiTi superelástico, aço inoxidável, osso e tendão. Adaptado de Morgan et al. (2004).

No que tange a biocompatibilidade, o Nitinol pode ser aplicado na confecção de próteses que auxiliam em tratamentos traumáticos. Um exemplo dessa aplicação, conforme consta na Figura 6, é o grampo de Judet – com o intuito de tratar uma lesão torácica, esses componentes são próteses inseridas na costela do paciente. Antes das ligas NiTi terem essa aplicabilidade existia um grande problema de colocação dessas órteses, em função dos materiais disponíveis. Graças ao efeito de memória de forma do Nitinol, a liga antes de entrar em contato com o corpo e ser “aquecida” é extremamente maleável (MARTINS, 2009).



Figura 6 - Caso Clínico; reconstrução de tomografia computadorizada com ênfase no arcabouço ósseo torácico demonstrando múltiplas osteossínteses costais, fixadas por grampo de Judet. (VILLARINHO, 2010).

Uma das maiores aplicações do Nitinol, no que tange à área da biomédica são os *stents*. Com o objetivo de manter a artéria aberta e evitar sua obstrução, trata-se de um pequeno tubo que é colocado dentro da artéria – fazendo com que não haja interrupções no fluxo sanguíneo. Esses dispositivos são produzidos em uma malha ou fios soldados, cortados a laser ou fotogravados em folhas (DUERIG; PELTON; STOECKEL, 1999). A utilização do Nitinol para a fabricação de *stents*, conforme ilustrado na Figura 7, garante um material que oferece características superiores quanto à memória de forma e superelasticidade, e há provas na redução da extensão do recuo arterial em comparação com a angioplastia – além de proporcionar uma opção menos invasiva para o tratamento da doença (AZAOUZI et al., 2013).



Figura 7 - Stent, Nitinol. (MORGAN, 2004)

Outra característica importante dessa liga, em comparação ao aço inoxidável é a baixa sensibilidade do Nitinol à ressonância, o que produz uma imagem mais limpa e nítida (MORGAN, 2014). Um exemplo são os dispositivos chamados Homero Mamalok®, que funciona como um detector de câncer de mama para o diagnóstico da doença (GODOI, 2015).

Ainda no campo da medicina diagnóstica, os fios-guia produzidos em Nitinol, de modo a explorar a sua superelasticidade, em detrimento dos aços inoxidáveis, possuem maior resistência à torção – auxiliando na capacidade de manobra através dos vasos sanguíneos (TOWHIG et al., 2014). No campo da radiologia, há o emprego desses fios como cateteres nas veias e artérias, como um teste diagnóstico, chamado cateterismo – essa abordagem teve tem como pontos positivos a sua eficiência e ser menos invasivo ao paciente. Mesmo com o avanço das tecnologias de ressonância magnética, raios-x e fluorescência, esse diagnóstico obteve maiores evoluções, porém com a Liga NiTi presente como cateter (GODOI, 2015).

Graças a sua biocompatibilidade, recuperação pelo efeito de memória de forma e suas propriedades mecânicas que são próximas ao comportamento do tecido ósseo, o Nitinol vem sendo amplamente utilizado como implantes ósseos, como ilustra a Figura 8. A porosidade interconectada desses implantes em ligas NiTi permite o transporte de fluidos dentro de uma estrutura para a integração óssea. (BEWERSE; BRINSON; DUNAND, 2014).

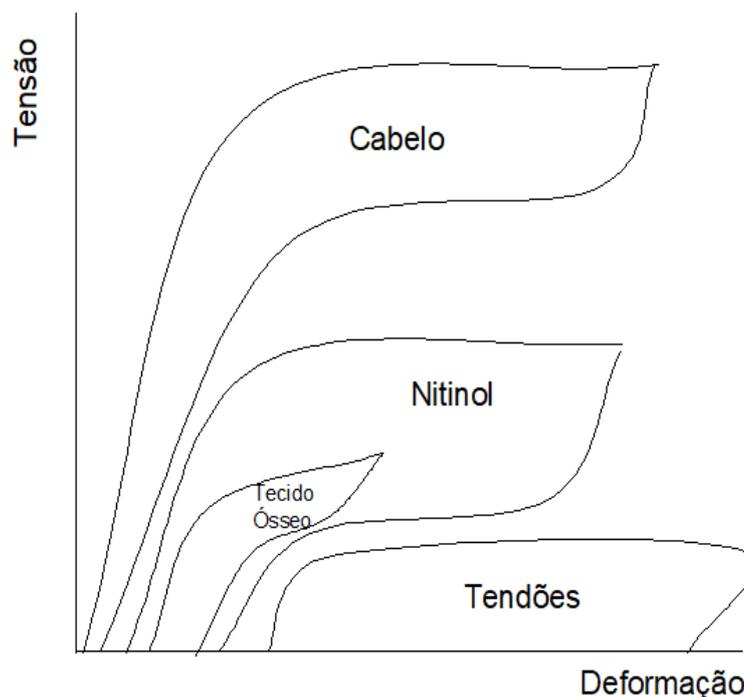


Figura 8 - Comparação do comportamento mecânico do Nitinol em relação a alguns tecidos do corpo humano (DUERIG; PELTON, 1999).

A indústria bélica também possui grande interesse nessas ligas na função de absorver o choque no material do colete, também como placas de proteção em tanques de guerra e em veículos blindados – tal fato decorre da alta amplitude de tensão, que combinada com um único impacto, permite as condições ótimas das ligas SMA para o amortecimento (HUMBEECK, 1999).

Na engenharia civil, o uso de ligas de NiTi para o controle da estrutura tem sido implementado para aplicações práticas com bastante sucesso, embora ainda estejam em fase de testes, a implementação baseia-se na capacidade de amortecimento da liga, representando sua capacidade de dissipar energia de estruturas mecânicas sujeitas a cargas de vibração. Essa característica se dá pela reorientação martensítica que atua na absorção de impactos. (SONG; MA; LI, 2006). Na robótica, as ligas têm sido utilizadas como atuadores, tendo um maior predomínio da sua aplicação dessa forma. Na indústria automobilística, o Nitinol pode ser encontrado em componentes de radiador, anéis de pistão, controle de transmissão, válvulas, atuadores e outras aplicações (JANI et al., 2014).

Por fim, é interessante comparar o desempenho mecânico das ligas de NiTi e aços inoxidáveis. Embora as ligas de níquel-titânio sejam mais caras que o aço inoxidável (JANI et al., 2014), elas apresentam melhor desempenho em muitas aplicações devido à sua maior deformação elástica, maior resistência mecânica (tanto à tração, quanto ao torque), menor densidade e melhor biocompatibilidade - não tendo restrição apenas as aplicações médicas -

ampliando o seu escopo de atuação, de modo a aperfeiçoar os produtos já existentes no mercado ou desenvolver novas aplicações. A Tabela 1 demonstra uma comparação entre certas características do aço inoxidável austenítico e uma liga NiTi aproximadamente igual.

Tabela 1 - Comparação entre algumas propriedades das ligas NiTi e do aço inoxidável austenítico. Adaptado de Desroches et al. (2004) e Johnson Matthey Medical Componentes (2016).

Propriedade	NiTi	Aço inoxidável Austenítico
Deformação recuperável	8,0%	0,8%
Biocompatibilidade	Excelente	Boa
Resistência à corrosão	Excelente	Excelente
Módulo de elasticidade	21 - 41 GPa (martensita)	193 - 215 GPa
	30 - 83 GPa (austenita)	
Densidade	6,45 g/cm ³	8,03 g/cm ³
Limite de resistência	895 - 1900 MPa	Aprox. 760 MPa

3 MODELO CONSTITUTIVO

O presente capítulo discorre brevemente sobre a modelagem matemática para o efeito de memória de forma embutido no ANSYS, modelo este desenvolvido por Auricchio (2001), bem como sobre o que são não-linearidades e como o software lida com as mesmas.

3.1. 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 (DENISE. M.S. GERSCOVICH, 2014). 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. Segundo Paiva (2000), o comportamento termomecânico das SMA pode ser analisado sob duas óticas, que são: microscópica – a nível molecular – e macroscópica, enquanto Oliveira (2008) acrescenta uma terceira ótica, a mesoscópica – partículas de estrutura cristalina.

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 (POPOV e LAGOUDAS, 2007; BAETA-NEVES et al, 2004; PAIVA e SAVI, 2005; PAIVA e SAVI, 2006)

O modelo constitutivo para ligas com memória de forma contido no Ansys foi desenvolvido por AURICCHIO (2001), este é um modelo fenomenológico que assume um regime de pequenas deformações. Nesse caso a densidade de energia livre pode ser descrita como:

$$\Psi(\theta, \epsilon, \epsilon^{tr}, T) = \frac{1}{2}K\theta^2 + G\|\epsilon - \epsilon^{tr}\|^2 + \beta(T - T^*)^+ \|\epsilon^{tr}\| + \frac{h}{2}\|\epsilon^{tr}\|^2 + \tau_{\epsilon_L}(\epsilon^{tr}) \quad (3.1)$$

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

parte positiva da função; β 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, τ_{ε_L} é uma função indicatriz utilizada para satisfazer as restrições na norma da deformação de transformação de fase.

$$\tau_{\varepsilon_L} = \begin{cases} 0 & \text{se } \|\epsilon^{tr}\| \leq \varepsilon_L \\ +\infty & > \varepsilon_L \end{cases} \quad (3.2)$$

onde ε_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:

$$\begin{cases} p = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = K\theta \\ s = \frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon} = 2G(\epsilon - \epsilon^{tr}) \\ \mathbf{X} = -\frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon^{tr}} = \mathbf{s} - \beta(T - T^*)^+ \frac{\epsilon^{tr}}{\|\epsilon^{tr}\|} - h\epsilon^{tr} - \gamma \frac{\epsilon^{tr}}{\|\epsilon^{tr}\|} \end{cases} \quad (3.3)$$

onde $p = tr(\boldsymbol{\sigma})/3$ e s são respectivamente as partes volumétrica e desviadora da tensão $\boldsymbol{\sigma}$ e \mathbf{X} é a força termodinâmica associada à deformação de transformação de fase. A variável γ é resultado da função indicatriz relativa à sub-diferencial $\partial \tau_{\varepsilon_L}(\epsilon^{tr})$ que é definida como:

$$\tau_{\varepsilon_L} = \begin{cases} \gamma = 0 & \text{se } \|\epsilon^{tr}\| < \varepsilon_L \\ \gamma \geq 0 & \text{se } \|\epsilon^{tr}\| = \varepsilon_L \end{cases} \quad (3.4)$$

Sendo:

$$\partial\tau_{\varepsilon_L}(\epsilon^{tr}) = \gamma \frac{\epsilon^{tr}}{\|\epsilon^{tr}\|} \quad (3.5)$$

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

$$F(X) = \|X\| - R \quad (3.6)$$

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:

$$\dot{\epsilon}^{tr} = \dot{\zeta} \frac{\partial F}{\partial X} = \dot{\zeta} \frac{X}{\|X\|} \quad (3.7)$$

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:

$$\begin{cases} \dot{\zeta} \geq 0 \\ F \leq 0 \\ \dot{\zeta} F = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

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

$$\sigma_i^{AM} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) + R] \quad (3.9)$$

$$\sigma_f^{AM} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) + R + h\|\epsilon^{tr}\|] \quad (3.10)$$

$$\sigma_i^{MA} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) - R + h \|\epsilon^{tr}\|] \quad (3.11)$$

$$\sigma_f^{MA} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\beta(T - T^*) - R] \quad (3.12)$$

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

3.1.1. Descrição dos Parâmetros do Modelo

Tabela 2 – Parâmetros do Modelo do ANSYS. Fonte: Própria

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

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 (AURICCHIO; CODA; REALI; URBANO, 2009).

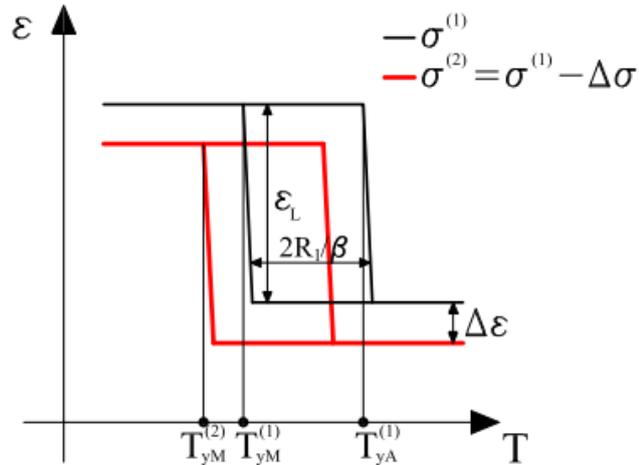


Figura 9 - Curva deformação x temperatura para dois ciclos térmicos com tensões diferentes

Através dos resultados experimentais obtêm-se o diretamente o valor de ε_L , E e β pelas suas respectivas fórmulas:

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \quad (3.14)$$

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

$$R = \frac{\beta}{2} (T_{yA}^{(1)} - T_{yM}^{(1)}) \quad (3.15)$$

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

$$h = \frac{1}{\frac{1}{\beta} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} - \frac{1}{E}} \quad (3.16)$$

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

$$T^* = T_{yM}^{(1)} + \frac{R - \sigma^{(1)}}{\beta} \quad (3.17)$$

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 $m = 0$.

4 COMPARAÇÃO NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE ENSAIO DE TRAÇÃO

O presente capítulo tem por finalidade apresentar uma comparação entre resultados experimentais de um teste de tração performedo em um fio de SMA e a simulação numérica realizada no ambiente interativo do ANSYS Workbench, o qual utiliza o modelo descrito previamente.

4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

A caracterização do fio de SMA realizada por Monteiro et al (2016) foi realizada em uma liga Ni-Ti (54.4% Ni e 45.2% Ti) com diâmetro de 1.71 mm e 200 mm de comprimento. O processo de caracterização descritos pelos autores é realizado em considerando dois testes: *Digital Scan Calorimeter* (DSC) e teste de tração. O DSC é um calorímetro utilizado se obter os resultados de temperaturas de transformação (M_f , M_s , A_f e A_s). O teste de tração é realizado em uma máquina universal de tração com alongamento prescrito de $\varepsilon = 4 \times 10^{-1} s^{-1}$ a uma temperatura constante de 303K.

Segundo os autores, o teste de DSC forneceu os seguintes resultados $M_f = 310.5K$, $M_s = 329.2K$, $A_f = 400.9K$ e $A_s = 381.4K$. E para o teste de tração foi possível obter a tensão máxima de SMA, isto é máxima tensão possível (sem que haja plastificação do material) para total transformação de martensita induzida por tensão e alongamento recuperável máximo de 6.03%.

4.2. SIMULAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Com os dados obtidos experimentalmente por Monteiro et al (2016) foi possível calibrar o modelo numérico com os sete parâmetros exigidos para implementação do modelo de memória de forma presente no ANSYS. A tabela 3 mostra os valores de entrada para os parâmetros.

Tabela 3 - Parâmetros de simulação ANSYS.

Constante	Significado	Valor
C1	h	1 GPa
C2	T_0	20 °C
C3	R	120 MPa
C4	β	2 MPa \times °C ⁻¹
C5	$\bar{\epsilon}_L$	0,057 mm ⁻¹
C6	E_m	23 GPa
C7	m	0

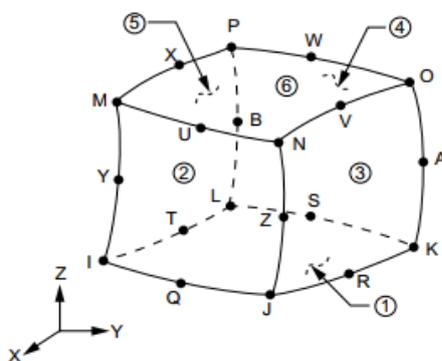
Além destes parâmetros, são necessários também o módulo de Young (E) e Coeficiente de Poisson (ν), isto é, as propriedades elásticas da Austenita. Podendo ser os valores encontrados na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades Elásticas da Austenita

Parâmetro	Valor
E	54 GPa
ν	0,3

Como parte do processo de modelagem por elementos finitos do ANSYS, faz-se necessário entender as limitações do método que o software faz uso. De acordo com o material de referência do mesmo, o modelo de materiais SMA possui suporte para discretização da geometria a partir de elementos de viga, planos e sólidos (ANSYS, 2021).

O processo de discretização das geometrias, desenvolvidas no SolidWorks, foi realizada utilizando o elemento do tipo sólido SOLID 186. Esse é um elemento sólido 3D de ordem superior definido por 20 nós possuindo 3 graus de liberdade nas direções x, y e z, por nó (ANSYS, 2021). Este elemento pode ser observado na Figura 10.

**Figura 10** - Geometria SOLID186. Fonte: ANSYS, 2021.

Tratando-se de um estudo de SME induzido por tensão, o carregamento proposto pela Figura 11 foi aplicado na simulação. Consistindo em quatro etapas sendo estas: Carregamento, de 0 a 1, onde ocorre a mudança de variante $M \rightarrow M^+$ (martensita induzida por tensão). Descarregamento, onde ao seu término pode ser observada a deformação residual presente no material, de 1 a 2. Aquecimento, na qual se processa a transformação de fase $M^+ \rightarrow A$, presente na etapa de 2 a 3. E por fim, resfriamento, onde, através da transformação de fase $A \rightarrow M$ ocorre o aparecimento da fase M . Observando que o modelo é quasiestático, portanto, o tempo apresentado na simulação não representa o tempo físico.

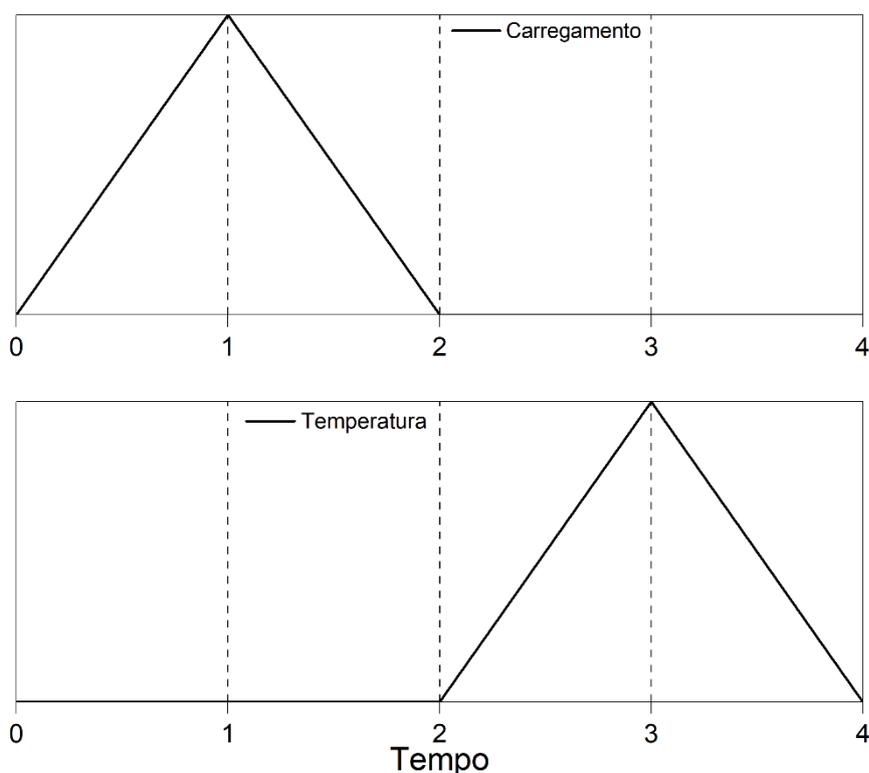


Figura 11 - Diagrama de Carregamento Termomecânico. Fonte própria.

4.2.1. Geometria do Fio e Condições de Contorno

Com o objetivo de validar o modelo com os parâmetros necessários, o estudo experimental realizado por Monteiro et al (2016) foi reproduzido no ambiente do ANSYS. Portanto, um fio com 1,71 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento foi utilizado como geometria para tal validação, que pode ser visto na Figura 12.

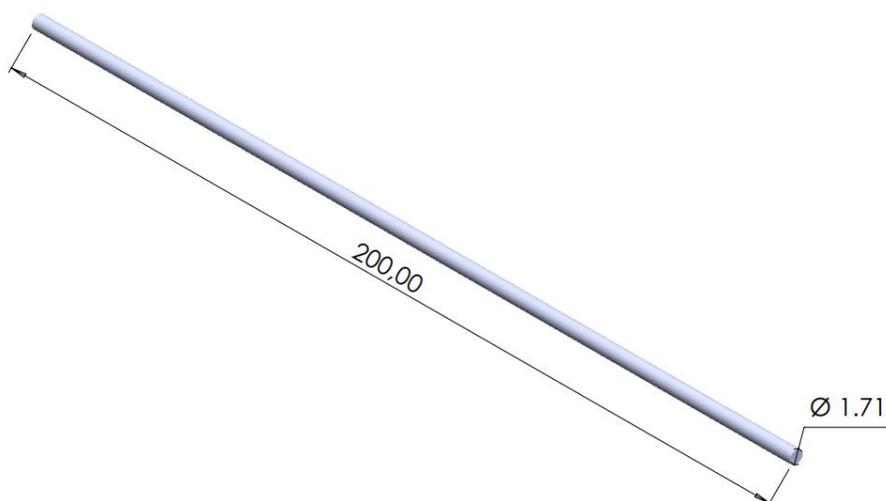


Figura 12 - Geometria do Fio

Para simular as condições de contorno um suporte fixo foi configurado na face posterior do fio e em sua outra extremidade uma carga mecânica de 700 MPa foi aplicada no sentido de tração. O que pode ser observado na Figura 13. A forma como o carregamento geral, isto é, mecânico e térmico foi aplicado no fio é mostrado na Figura 11.

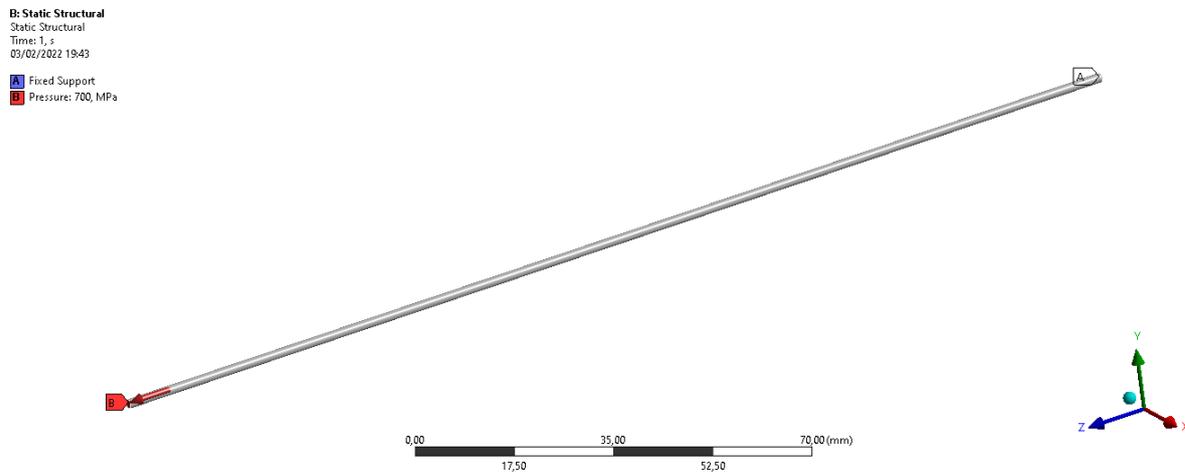


Figura 13 - Fio SMA Condições de Contorno.

4.2.2. Convergência de Malha

O estudo de convergência de malha foi realizado nesta geometria como forma de validar os resultados numéricos. Diferentes tamanhos de elementos foram testados e os resultados podem ser visto na Figura 14.

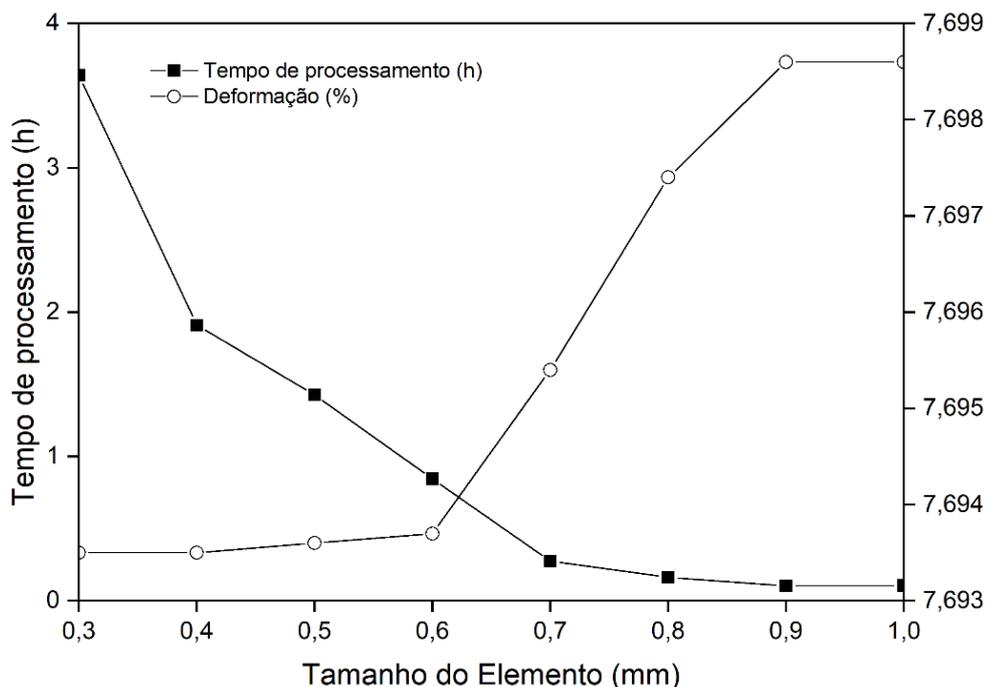


Figura 14 - Convergência de Malha para o fio. Fonte: Própria.

A curva de deformação tende a uma estabilização com elementos menores que 0,7 mm. É perceptível a pouca variação na deformação na faixa de 0,3 mm a 0,5 mm. O elemento de tamanho 0,5 mm foi selecionado por apresentar uma relação custo computacional x precisão dos resultados bons quando comparados aos outros elementos. Visto que diminuir mais o tamanho dos elementos da malha proporciona um tempo de processamento muito superior, mas altera pouco a precisão dos resultados. A malha pode ser vista na Figura 15, seus dados estatísticos são: 8610 elementos e 42716 nós.

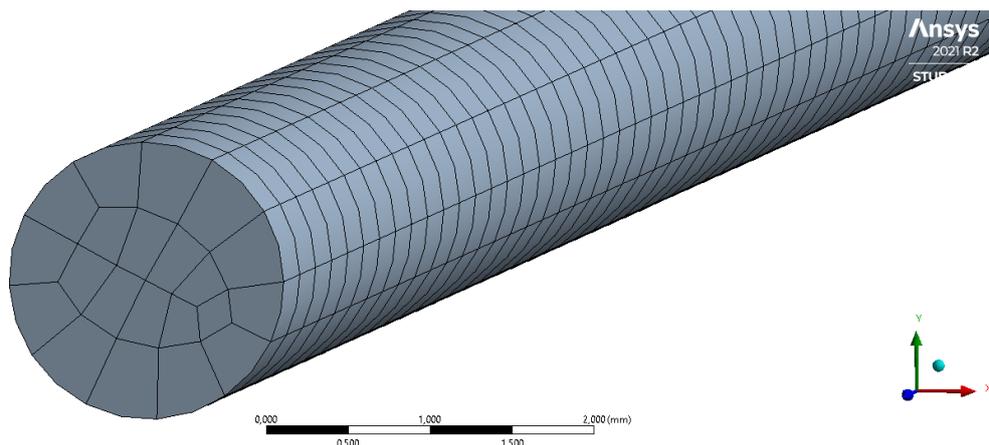


Figura 15 - Representação da malha. Fonte: Própria

O gráfico, presente na Figura 16, de fração martensítica representa a variação da fração volumétrica de martensita. Na presença da fase martensita maclada (M), ou martensita induzida por temperatura, a aplicação de tensão proporciona o deslizamento da estrutura cristalina do material, isto é, uma reorientação da rede. Propiciando a transformação para a fase martensita induzida por tensão (M^+).

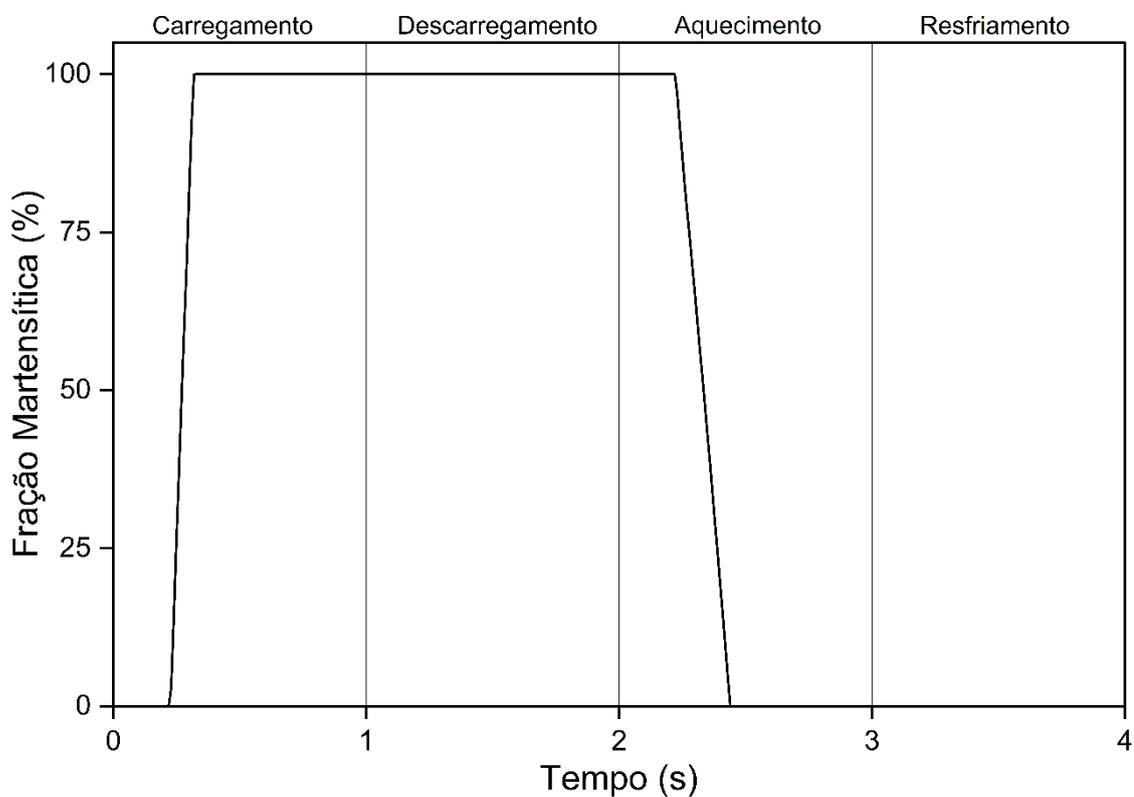


Figura 16 - Fração Volumétrica de Martensita. Fonte: Própria.

Os resultados mostram que na etapa 1, onde ocorre o carregamento, o aumento da fase martensítica induzida por tensão até o seu máximo de 100%. Durante o descarregamento, etapa 2, na fase de recuperação elástica do material, não há variação da fração M^+ , visto que a transformação contrária ($M^+ \rightarrow M$) só é possível por meio do “ciclo” térmico completo. Por fim, é possível observar a diminuição da fração martensita induzida por tensão dentro da etapa de aquecimento da liga até atingir o valor de zero. Nesse momento ocorre a transformação M^+ e M , isto é, a fração martensítica que não foi reorientada, em austenita A .

4.2.3. Validação Numérico Experimental

Como forma de validar a calibração dos parâmetros das Tabelas 3 e 4 e verificar o comportamento da curva tensão-deformação, a Figura 17 mostra os resultados obtidos, após a convergência.

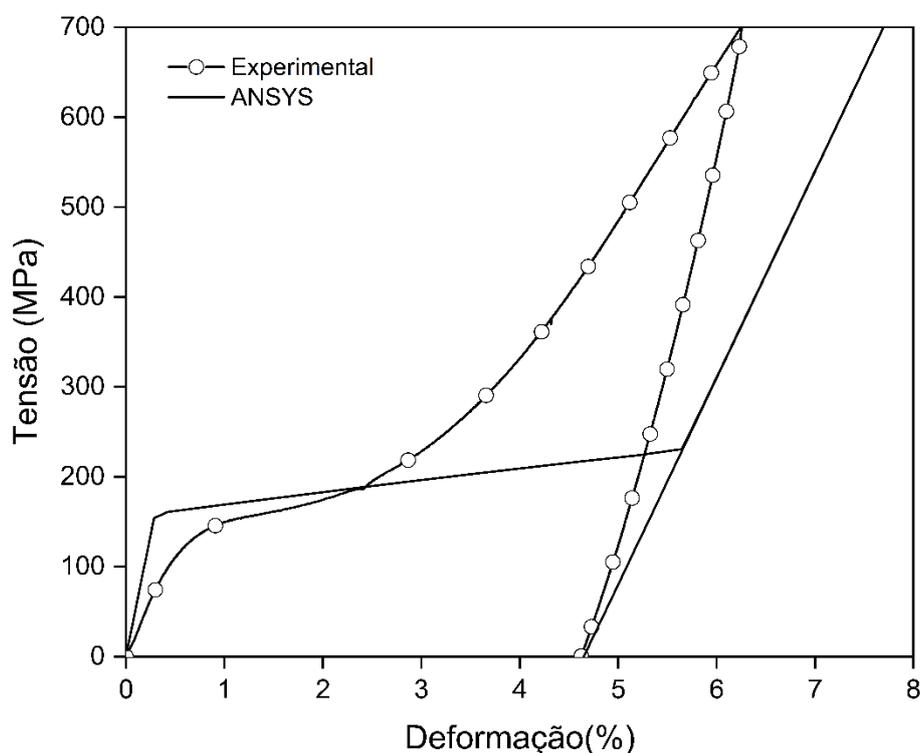


Figura 17 - Validação Numérico Experimental do fio. Fonte: Própria.

Foi observado que o modelo apresenta a curva característica de SME, de maneira a representar adequadamente o efeito e os resultados obtidos no ensaio de tração experimental realizado por Monteiro et al (2016).

5 DISPOSITIVO DA MANTA TÉRMICA

A modelagem da manta térmica para tubulações submersas se baseia no efeito de memória de forma assistida por tensão, principal conceito presente no trabalho. Para o correto funcionamento da mesma, fios de material SMA são inseridos em uma matriz, conforme exemplificado na Figura 18.

Com os fios tratados termomecanicamente para que o formato de arco seja recuperado a altas temperaturas, isto é, durante o ciclo de aquecimento e resfriamento. Porém, para que o efeito de memória de forma ocorra, há a necessidade da presença prévia de martensita induzida por tensão. Com isso a matriz, de material hiperelástico, funcionará como um restaurador do ciclo, agindo quando o fio esfria e a fase martensítica induzida por temperatura se formar.

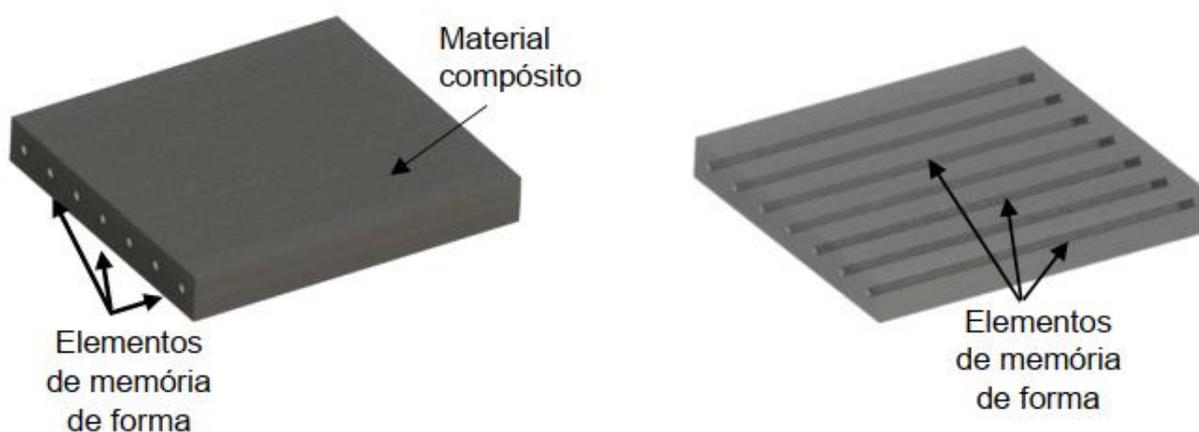


Figura 18 - Esquemática manta térmica. Fonte: Projeto FAPERJ (MONTEIRO, 2019)

5.1. ARCO DE MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA

O presente capítulo visa realizar um estudo quanto à resposta SME de um fio em formato de arco (formato “C”), quando exposto a um carregamento de flexão. Uma comparação numérico experimental quanto ao comportamento do material será realizada com os resultados obtidos por Alazzawi et al (2019).

5.1.1. Geometria do Arco

Fazendo uso do software SolidWorks, foi criada a geometria de um fio com formato “C” possuindo 157,08 mm de comprimento e 2,0 mm de diâmetro e um raio de curvatura de 50 mm, conforme Figura 19.



Figura 19 - Geometria do fio em formato “C”.

Segundo Alazzawi et al (2019), sob cargas de tração e compressão podem ser alcançados deslocamento relativamente baixos. Porém, sob cargas de torção e flexão deslocamentos maiores podem ser atingidos. Dessa forma, por predominar cargas de flexão e a possibilidade de obtenção de grandes deformações o formato curvo proposto é alvo do estudo.

Pode ser observado da geometria utilizada que o eixo neutro é assumido estando no eixo central do arco. Quando um carregamento é imposto ao formato, a tensão de tração máxima está presente no diâmetro interno enquanto a tensão de compressão máxima se encontra no diâmetro externo, ambas diminuindo gradualmente em direção ao eixo neutro. Vale observar que a recuperação da deformação residual pode não ocorrer de forma completa devido ao surgimento de deformação plástica durante o processo de carregamento ou de tensões abaixo da tensão crítica em determinadas regiões do arco.

5.1.2. Condições de Contorno

Para o estudo, foi necessário entender um pouco mais sobre o funcionamento do dispositivo. Visto que a condição de contorno para o suporte, isto é, onde o dispositivo seria fixado tem grande impacto nos resultados da simulação. Um estudo sobre como o ponto de fixação pode ser simulado foi realizado.

A princípio, têm-se dois tipos de suportes para utilização: o pivotado e o engastado. Num dispositivo com engaste em uma de suas pontas, um alto ponto de concentração de tensão seria o próprio engaste, além disso, o movimento de “esticar” o formato “C” para um fio reto é dificultado por essa condição de fixação, visto que os elementos próximos à região teriam um nível de distorção muito elevado. Para o a fixação do tipo pivotado, o ponto de fixação é capaz de rotacionar, permitindo assim uma menor deformação dos elementos na região, também é facilitada a obtenção da geometria deformada de um fio reto. Porém, no caso de aplicação de carga fora eixo horizontal, ou seja, paralelo a face ponto de aplicação de carga, o corpo não tem restrição do movimento de corpo rígido.

Para um mesmo carregamento a Figura 20 ilustra os pontos onde a tensão máxima ocorre para cada tipo de fixação.

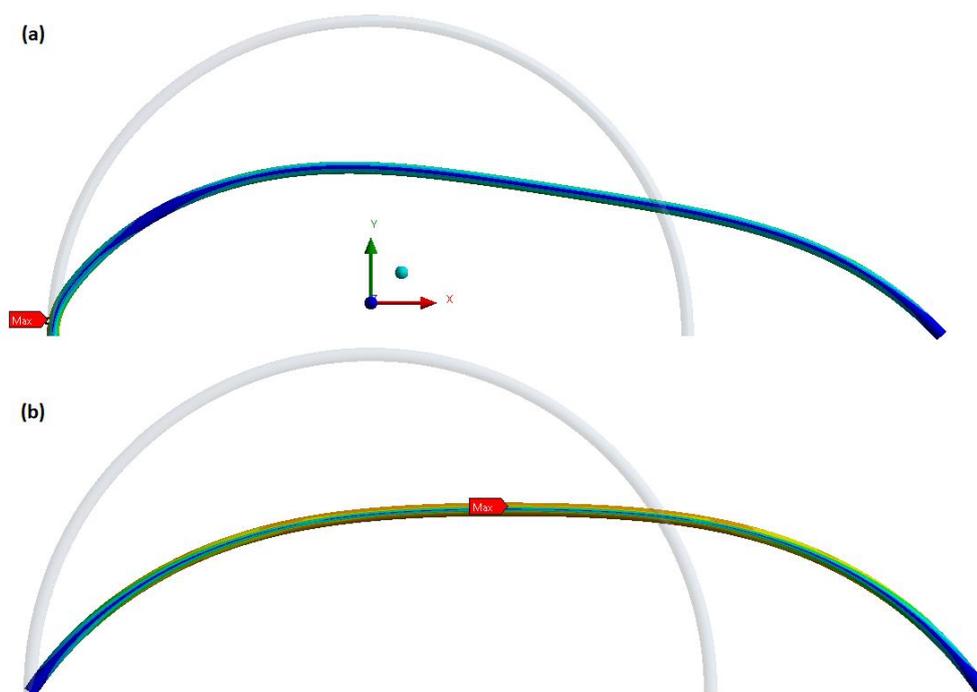


Figura 20 - Resultado comparativo da tensão equivalente de Von-Mises (a) engaste e (b) pivotamento. Fonte: Própria.

Para a simulação realizada, foi selecionado o pivotamento na face B e um deslocamento de 40 mm foi aplicado na outra extremidade do formato, como pode ser observado na Figura 21. O carregamento foi mantido da mesma forma como para o fio, ou seja, idêntico a Figura 11.

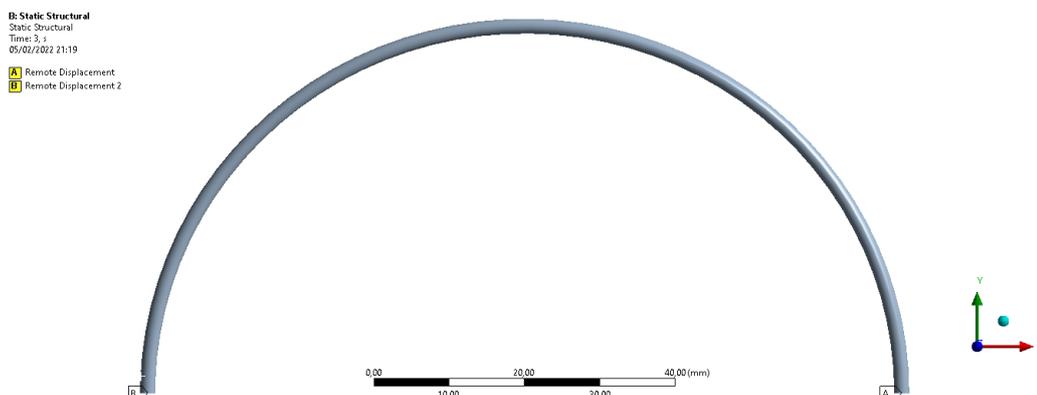


Figura 21 - Condições de Contorno do formato “C”. Fonte: Própria

5.1.3. Convergência de Malha

Para o estudo de convergência de malha com as condições de contorno definidas foi realizado um estudo semelhante do realizado com o fio para a obtenção da malha ideal, ou seja, a que oferece boa relação de precisão x tempo de processamento. A Figura 22 ilustra a convergência realizada.

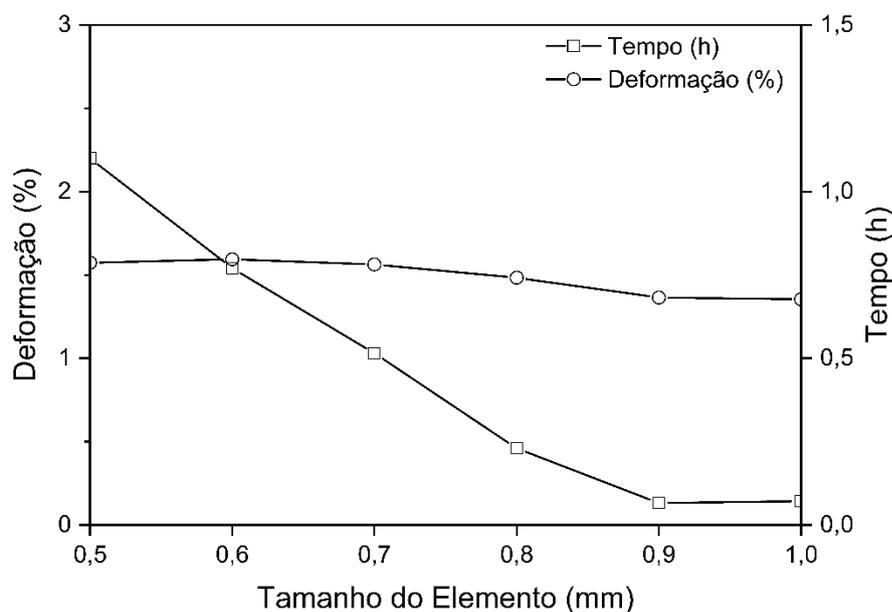


Figura 22 - Convergência de malha do formato “C”. Fonte: Própria.

Pode ser observado que a deformação tem uma tendência a se estabilizar por volta de 1,5% a partir do tamanho de elemento de 0,7 mm. O tamanho de elemento 0,5 mm foi selecionado para compatibilizar com o estudo do fio. A malha pode ser vista na Figura 23, suas estatísticas são: 8181 elementos, 39789 nós e tempo de processamento em torno de 1h 20 min.

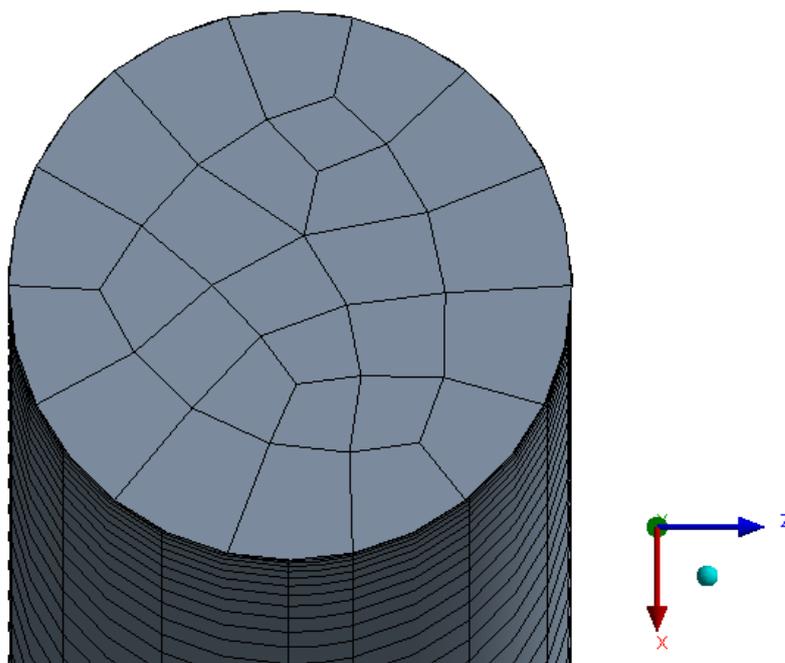


Figura 23 - Representação da malha do formato "C". Fonte: Própria.

5.1.4. Comparação Numérico Experimental do Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão realizado por Alazzawi et. al (2019) possui algumas diferenças em relação ao representado na presente simulação, a principal observação a ser realizada é quanto ao comportamento do material e da geometria quanto a flexão. Diferentemente do estudo realizado por Alazzawi et. al, no presente estudo ocorre o descarregamento mecânico, conforme Figura 11. Com isso, a deformação elástica ocorre de forma isotérmica à temperatura de 25 °C. Após a recuperação elástica, a etapa de aquecimento da liga toma início e ao atingir-se a temperatura de transformação martensita-austenita ocorre a recuperação da deformação imposta. Logo, o modelo representa adequadamente o efeito proposto dentro da configuração proposta de condições de contorno. O resultado pode ser observado na Figura 24.

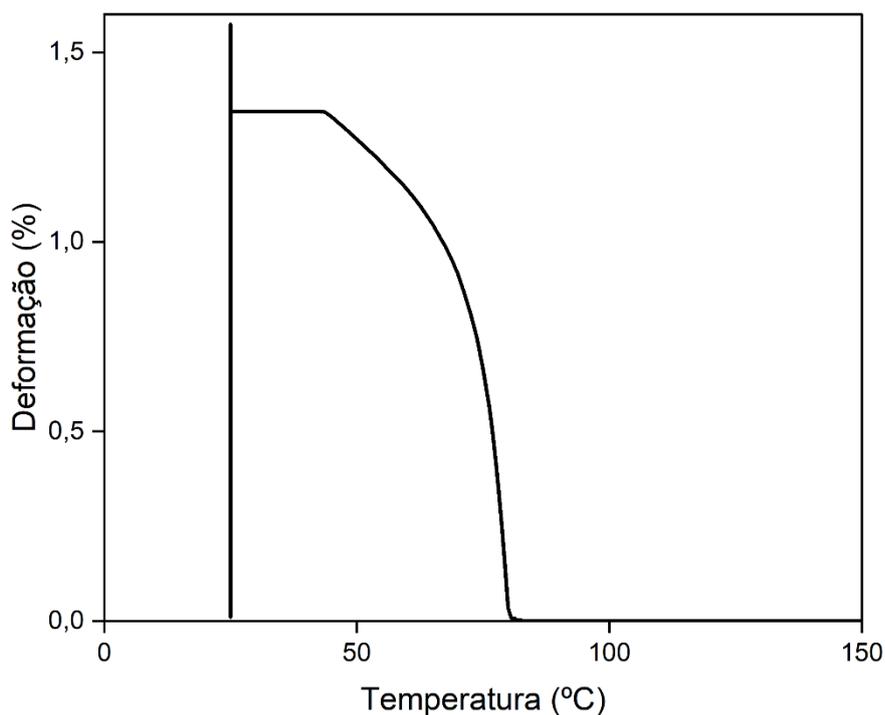


Figura 24 - Curva Deformação x Temperatura formato “C”. Fonte: Própria.

5.1.5. Comparação do modelo em função da geometria: Fio x Arco

Para a realização de uma comparação das respostas do modelo para a geometria estudada de formato “C”, foi necessário simular o fio com um deslocamento prescrito. O deslocamento aplicado de 3,6 mm em sua ponta, foi calculado para que se tivesse uma deformação máxima próxima de 1,8% de forma similar ao resultado encontrado no arco com deslocamento prescrito de 50 mm.

O aquecimento intermediário foi realizado utilizando-se 3 temperaturas 50°C, 70°C e 100°C. E os resultados podem ser observados na Figura 25. Os valores de tensão equivalente máxima e fração martensítica para o fio foram 182,7 MPa e 33,7%, respectivamente. Para o arco os resultados obtidos de tensão equivalente máxima e fração martensítica foram 225,5 MPa e 13,1%, respectivamente. A deformação a ser recuperada, ao término da recuperação elástica (tempo 1→2) é de 1,61% para o arco e 1,58% para o fio. A Figura 26 ilustra a comparação entre o percentual de fase martensítica induzida por tensão para ambas as geometrias.

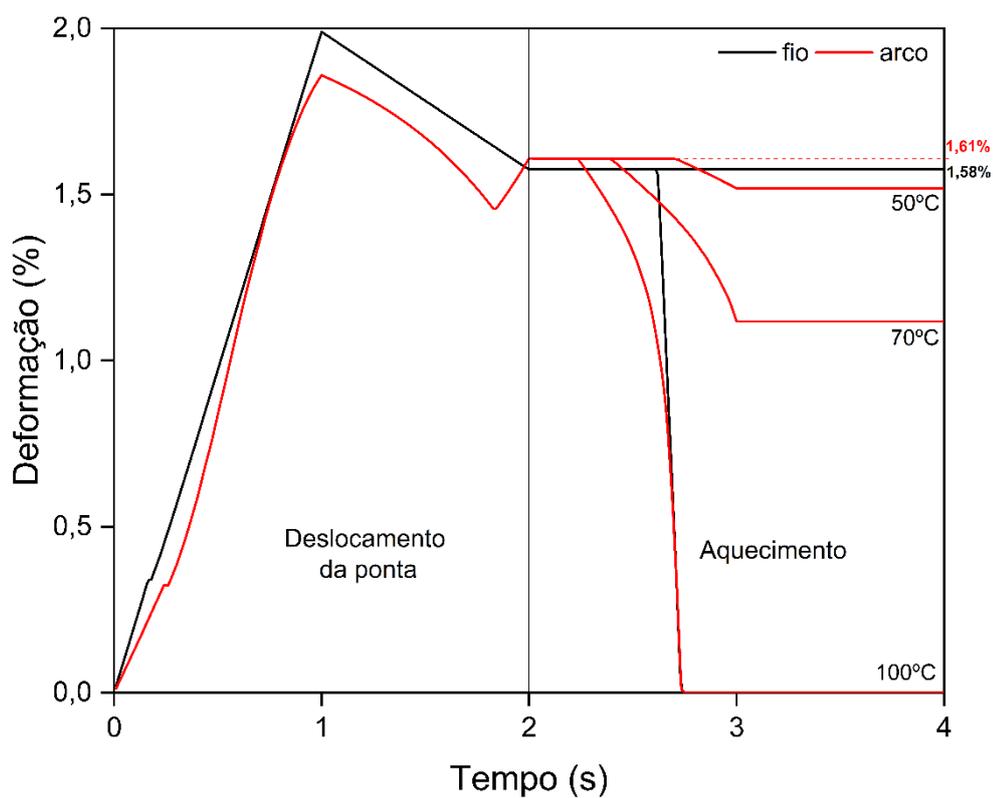


Figura 25 - Comparação da deformação fio x arco e influência da temperatura na recuperação. Fonte: Própria.

Foi observado que com uma temperatura de 50°C o arco já inicia a recuperação da deformação, isto é, já ocorre a transformação da martensita induzida por tensão em austenita ($M^+ \rightarrow A$). Fato que não é observado para o fio, visto que a temperatura de transformação A_s é de aproximadamente 100°C.

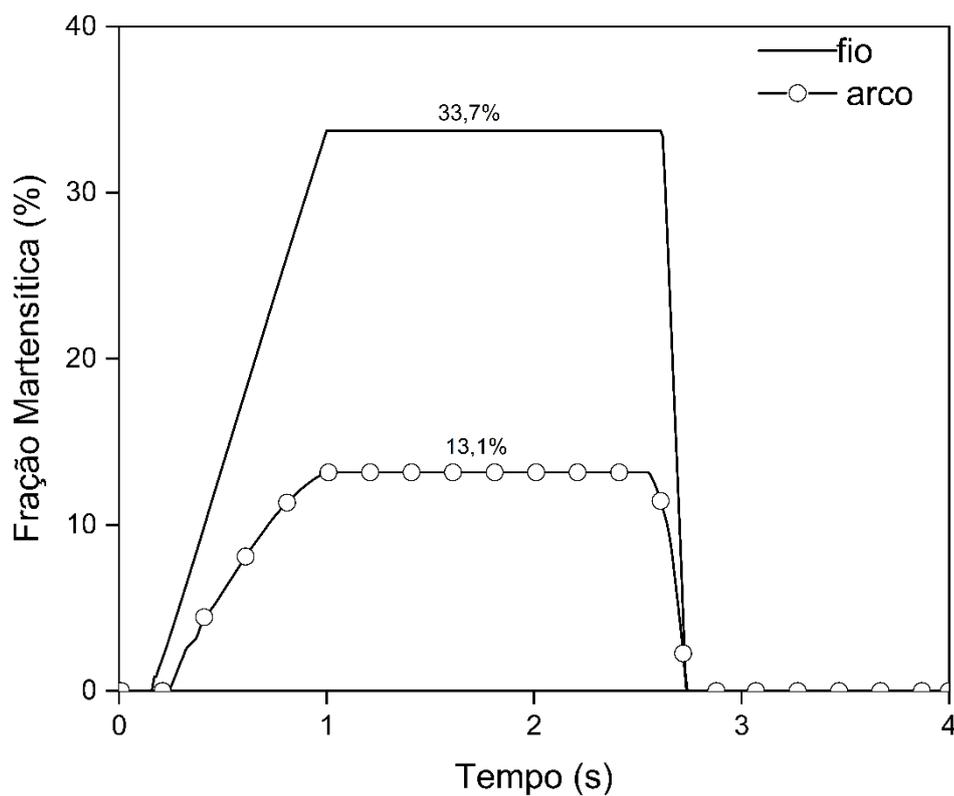


Figura 26 - Comparação da fração martensítica fio x arco. Fonte: Própria

Na Figura 27 é mostrado o quanto, para o arco, pode ser recuperado de deformação com aquecimento mencionado anteriormente. Os valores de recuperação observados foram de 0,09%, 0,49% e 1,61% para 50°C, 70°C e 100°C, respectivamente. Isso é, para um aquecimento de 100°C a recuperação é total.

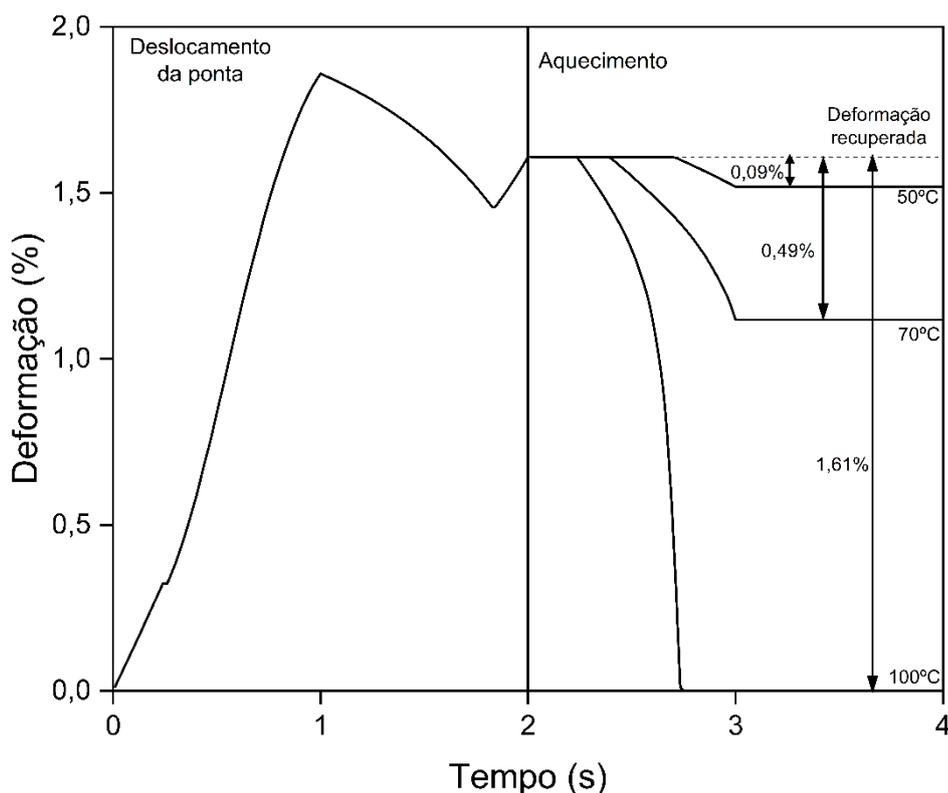


Figura 27 – Influência da temperatura na recuperação da deformação para fio SMA em formato “C”. Fonte: Própria.

5.2. MANTA DE MATERIAL HIPERELÁSTICO

A hiperelasticidade se refere à capacidade de materiais sofrerem grandes deformação elásticas. Esse tipo de comportamento pode ser encontrado em materiais poliméricos como plásticos e borrachas. Materiais orgânicos, o tecido humano, por exemplo, pode ser modelado com esse comportamento (ANSYS, 2021; BISCHOFF, 2002). Algumas aplicações industriais encontradas para materiais hiperelásticos são pneus de carros, elastômeros, anéis de vedação, redutor de vibração, entre outras aplicações podem ser encontradas para tirar vantagem das características desse material (MOALLEMI et al, 2017). A hiperelasticidade é, em geral, caracterizada pelo comportamento não-linear elástico. O comportamento desse tipo de material é muito complexo, como consequência da não linearidade da relação tensão-deformação e alta deformabilidade. A complexidade está relacionada ao arranjo irregular permitido pela microestrutura dos sólidos poliméricos, que por sua vez, pode-se agrupar, em duas categorias: o comportamento compressível, isto é, a capacidade de sofrer grandes alterações volumétricas durante a deformação, essa é, em geral, a característica de materiais como a espuma, por

exemplo. E o comportamento incompressível ou quase incompressível, que se refere a pequenas mudanças volumétricas quando deformado. Esse tipo de comportamento é típico de borrachas (ANSYS, 2021; MOALLEMI et al, 2017).

Polímeros são amplamente utilizados na indústria de óleo e gás para isolamento térmico passivo de tubos de aço (LE GAC et al, 2014). Para o presente trabalho foi selecionado a borracha de Neoprene, material presente na biblioteca do ANSYS. Sendo o comportamento hiperelástico do material descrito através do modelo Neo-Hookean.

Para verificação dos parâmetros como tensão, deformação e fração volumétrica para o fio de memória de forma, foi utilizado o mesmo deslocamento, de 50 mm, para o conjunto manta hiperelástica e fio SMA, Figura 28. Para que dessa forma possa ser observado a resistência que a matriz oferece a deformação do arco e realizar uma análise do conjunto.

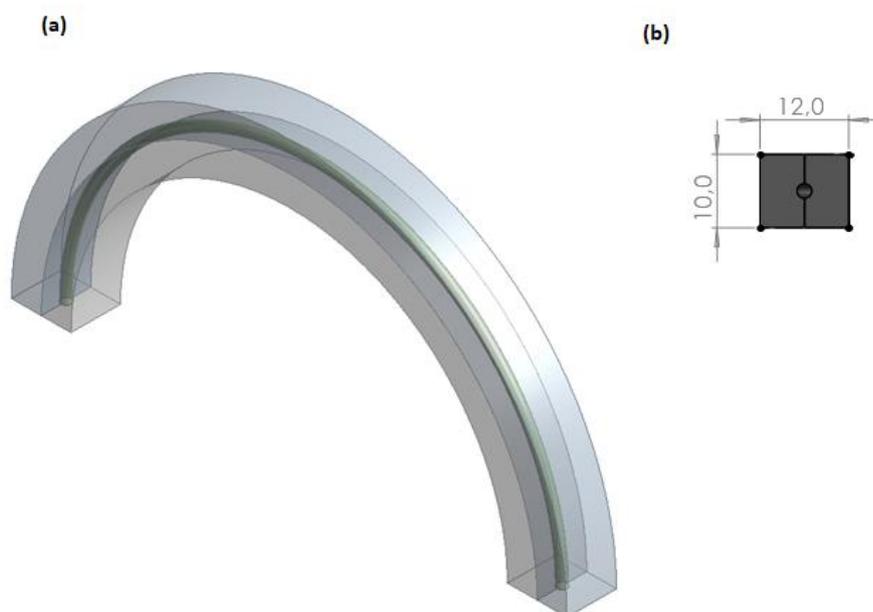


Figura 28 - Manta térmica de Neoprene com reforça de fio SMA. Fonte: Própria

Realizando uma análise do arco, é possível obter uma mudança de variante (M^+) em 30,1% como representado na Figura 29. Com o aumento da deformação é possível observar um aumento linear da quantidade de martensita induzida por tensão, obtendo o seu valor máximo para uma deformação total de 1,8%. A tensão equivalente máxima produzida pelo deslocamento prescrito é de 197,4 MPa, mostrado na Figura 30.

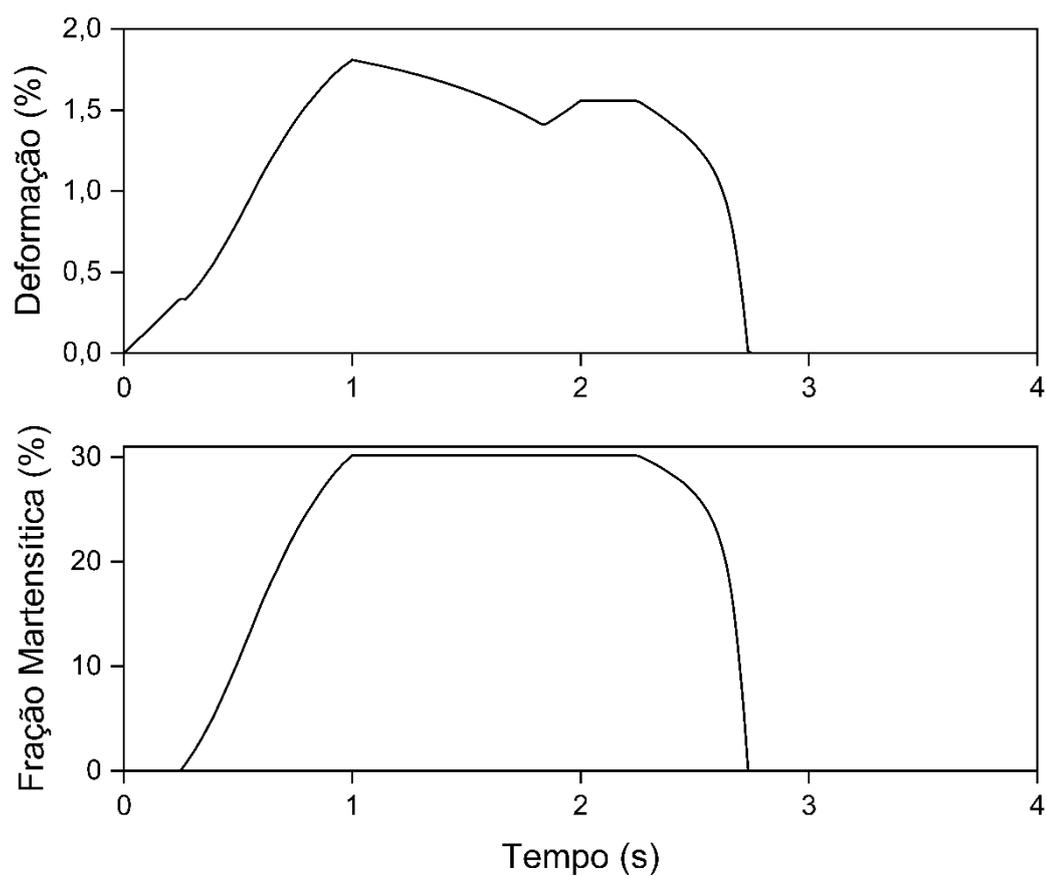


Figura 29 - Gráfico de Deformação e Fração martensítica em função do tempo de simulação. Fonte: Própria.

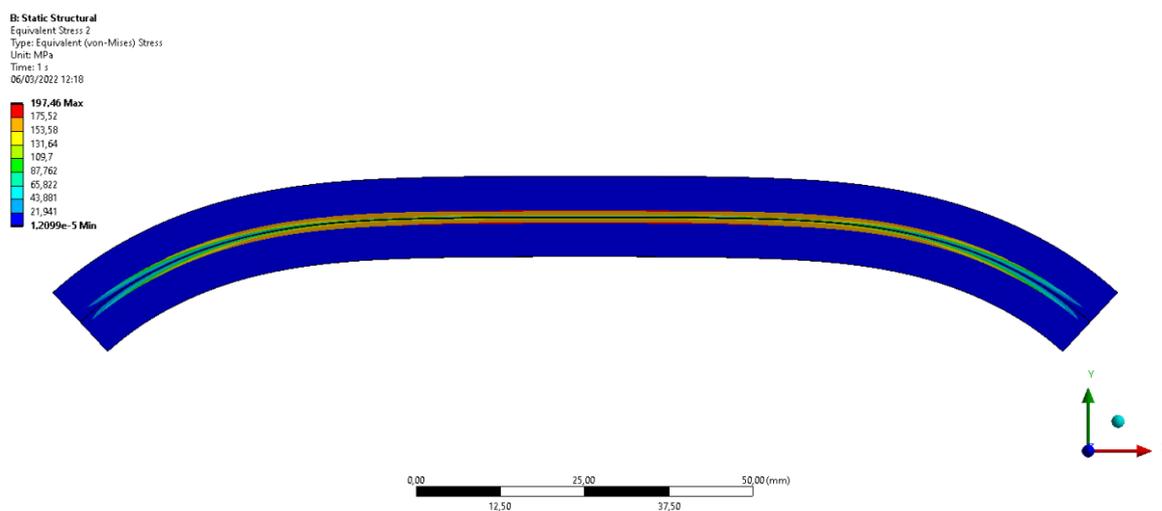


Figura 30 - Tensão máxima para manta com reforço SMA com $d = 2$ mm. Fonte: Própria

5.2.1. Comparação da resposta do modelo: arco sem acoplamento em matriz x com acoplamento

A partir da relação de deformação x temperatura, pode-se comparar qual influência a manta teria sobre o comportamento mecânico do fio SMA durante a etapa de deformação e de recuperação da deformação.

A partir da Figura 31, que representa a deformação em função do tempo para um arco acoplado a matriz de Neoprene, pode-se ser observado que para as temperaturas estudadas de 50°C, 70°C e 100°C a deformação recuperada foi de 0,08%, 0,48% e 1,56%, respectivamente. Nota-se, que a manta, ofereceu baixa resistência à deformação e recuperação do fio, fornecendo resultados praticamente iguais ao encontrado para os ensaios numéricos do arco (Figura 27), esse fato pode ser observado na figura 32.

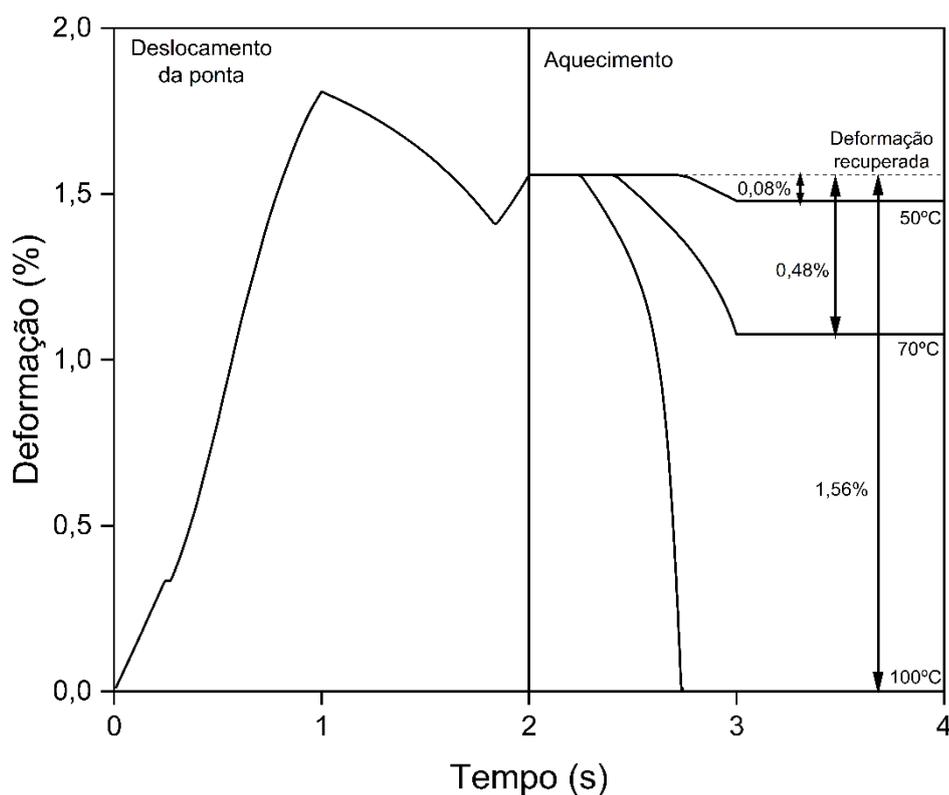


Figura 31 – Deformação recuperada para arco inserido em matriz de material hiperelástico. Fonte: Própria.

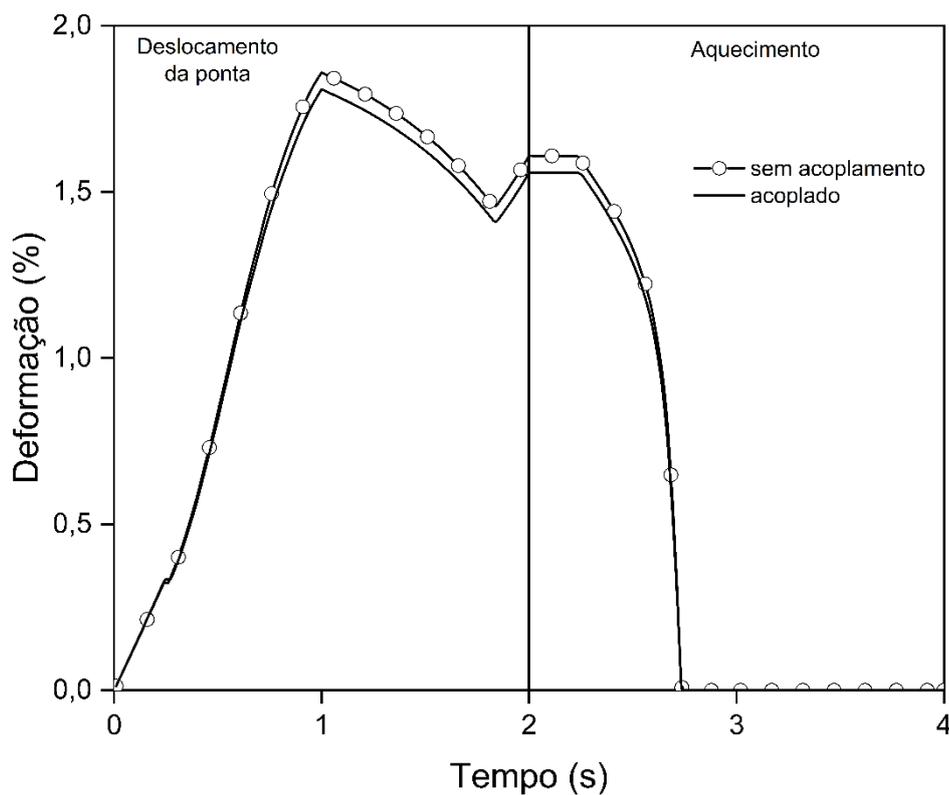


Figura 32 – Comparação da deformação máxima em função do tempo para arco com acoplamento e sem.
Fonte: Própria.

Outra observação a ser realizada é quanto a fração martensítica. A Figura 33 representa uma comparação para a transformação martensítica entre o arco e o mesmo acoplado à manta. É possível notar um aumento percentual de transformação muito elevado. Este pode ser causado pela condição de contato com atrito entre a manta e o arco. Com o acoplamento ocorre a transformação de 30,1% de martensita induzida por tensão.

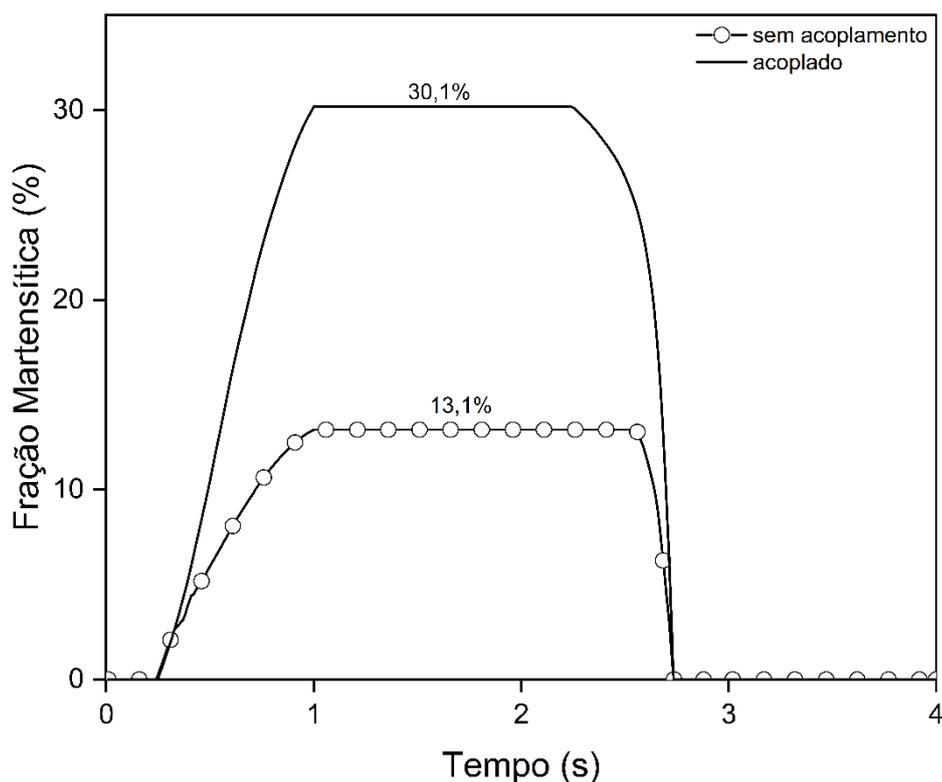


Figura 33 - Comparação da fração martensítica em função do tempo para arco com acoplamento e sem. Fonte: Própria.

5.2.2. Comparação da Manta com Variação do Diâmetro do Reforço SMA

Para entender a resistência do reforço da manta à flexão, pode-se variar o diâmetro do fio de Nitinol. Com o objetivo de entender se com diâmetros menores o mesmo ainda teria resistência suficiente para suportar a manta quando no formato deformado. Dessa forma, com fios de diâmetros menores há economia na aquisição do material além de se retirar um menor volume de Neoprene para a cavidade do reforço, conseqüentemente, aumentando o isolamento passivo.

Dentre os diâmetros disponíveis comercialmente foi selecionado o de 1 mm para o estudo. Esse, então, foi também modelado de forma a ter a geometria igual ao arco ensaiado anteriormente, divergindo somente no diâmetro do fio. Para o fio de 1 mm com acoplamento à matriz hiperelástica, as Figuras 34 e 35 mostram os resultados obtidos. A fração martensítica, deformação máxima e tensão máxima equivalente são, respectivamente, 9,49%, 0,77% e 231,7 MPa.

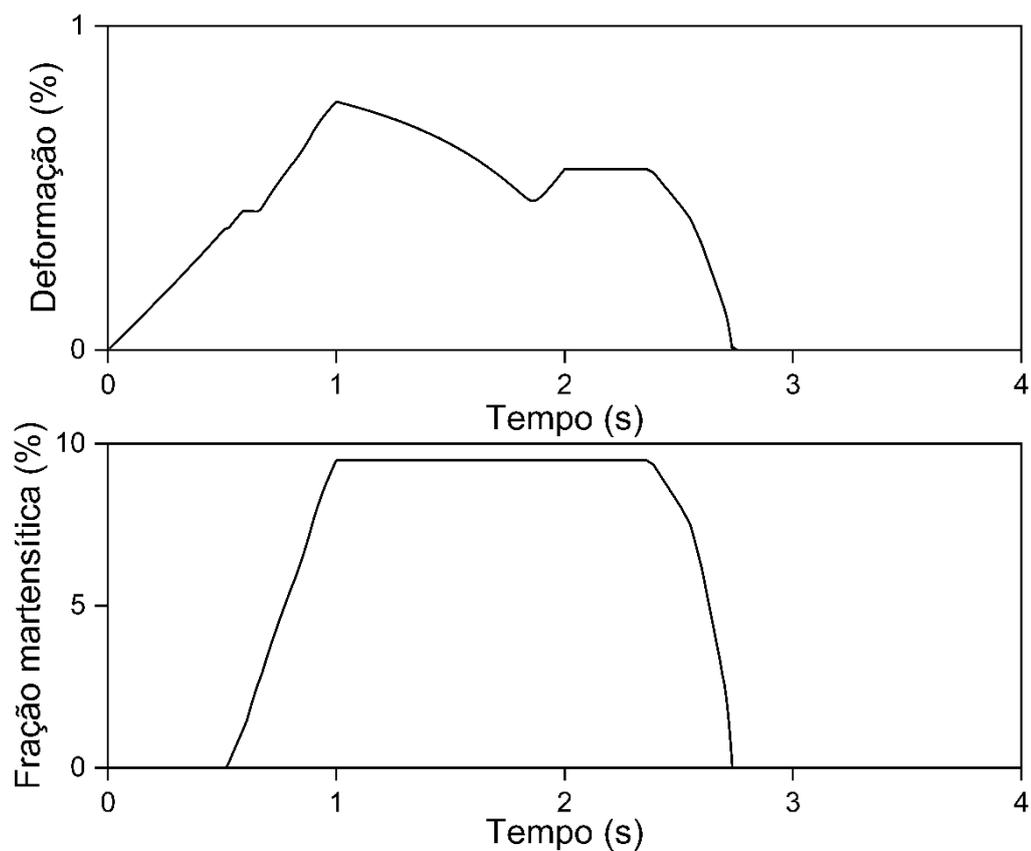


Figura 34 - Gráfico de Deformação e Fração martensítica em função do tempo de simulação para fio de 1 mm de diâmetro. Fonte: Própria.

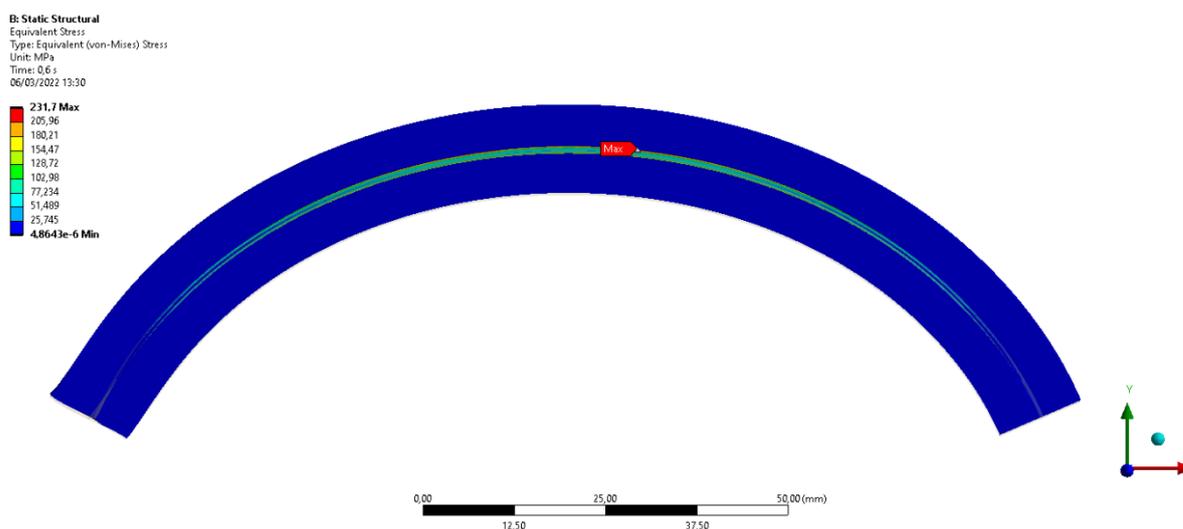


Figura 35 - Tensão máxima para manta com reforço SMA com $d = 1$ mm. Fonte: Própria.

A comparação com os valores obtidos para a manta com o arco de 2 mm é observada nas Figuras 36 e 37.

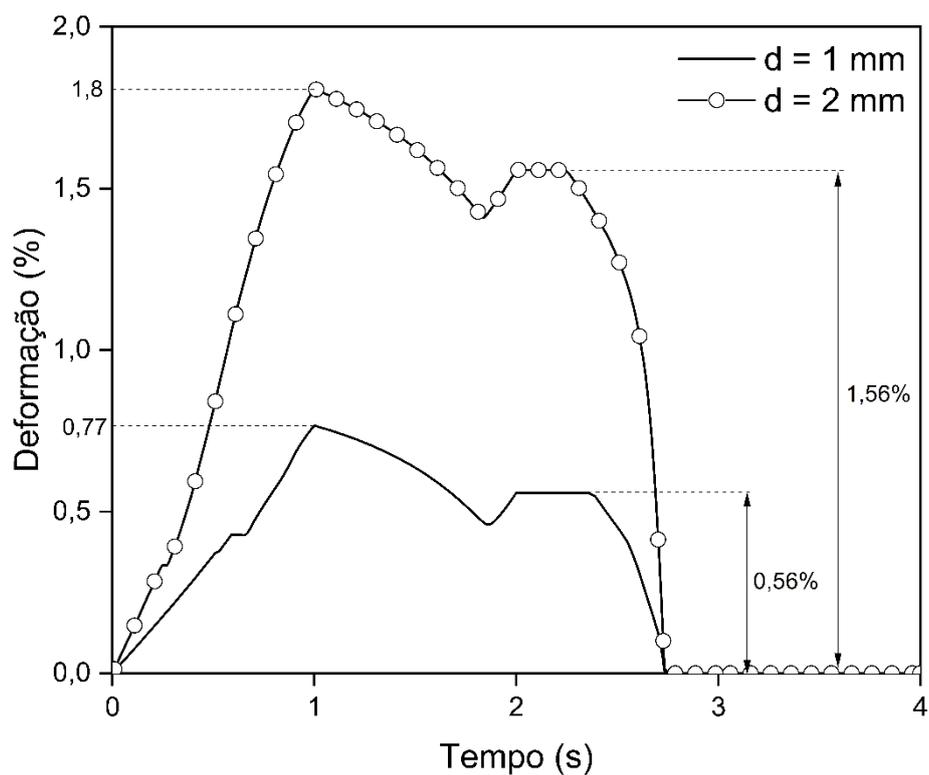


Figura 36 – Comparação da deformação máxima e recuperável para manta com variação do diâmetro do reforço. Fonte: Própria.

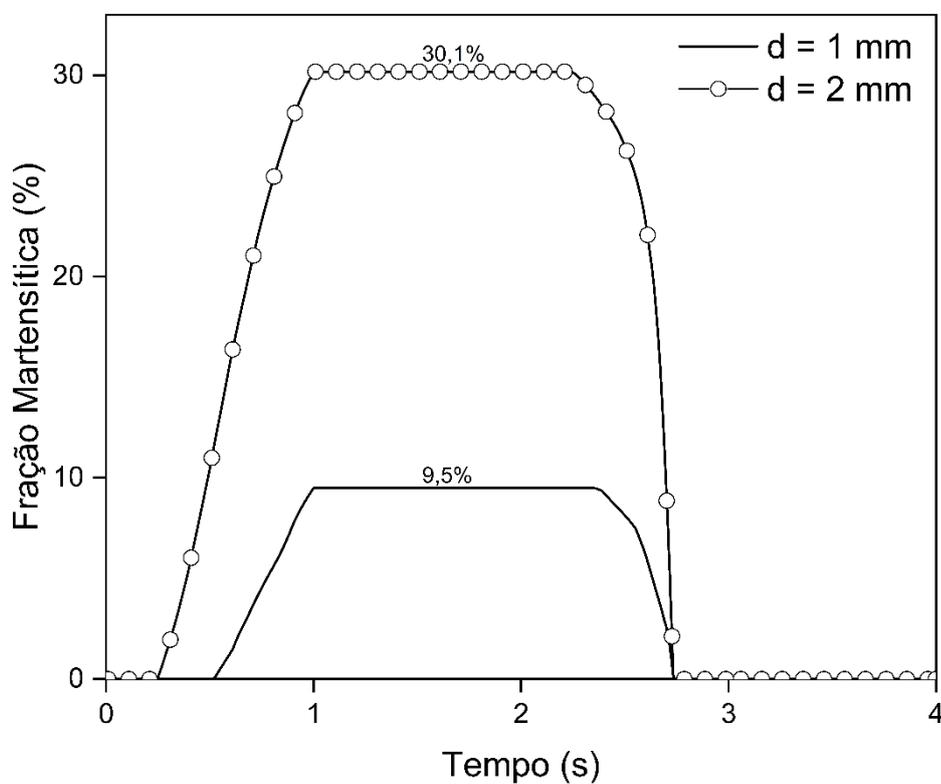


Figura 37 - Comparação da fração martensítica para manta com variação do diâmetro do reforço. Fonte: Própria.

Com a redução do diâmetro do fio ocorreu uma diminuição da fração martensítica na ordem de 3,17 vezes. Esse fato pode ter sido provocado pela redução da deformação máxima e conseqüentemente da deformação “aparentemente” plástica presente arco de 1 mm. Esse fato pode ser explicado pela menor resistência à deformação que o arco fornece com a redução de sua seção transversal.

Contudo, ainda assim, o arco de 1 mm possui resistência suficiente para suporte da manta térmica, também podendo ser utilizada para ensaio experimental.

6 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

O presente capítulo visa comparar os resultados obtidos para cada geometria no que tange a tensão equivalente, deformação e fração martensítica, verificando a influência do aquecimento na liga.

O modelo desenvolvido apresentou restrições quanto ao deslocamento prescrito máximo possível de ser aplicado. Por motivos de comparação dos resultados do fio com o a geometria em arco, esse primeiro foi novamente carregado, porém, com o intuito de se obter o mesmo valor de deformação máxima do arco.

Vale observar que os resultados obtidos se referem a tensão equivalente de Von Mises e deformação médias.

6.1. TENSÃO X DEFORMAÇÃO X TEMPERATURA

Essa parte no presente trabalho busca abordar a aplicação de um carregamento prescrito de 50mm a partir do modelo do arco com uma temperatura inicial de 25°C. O objetivo é a transformação desse arco em um fio, contudo o modelo mostrou ter uma limitação em relação ao carregamento que seria imposto, por isso o carregamento prescrito máximo utilizado foi de 50mm, essas análises foram realizadas em três geometrias diferentes: arco, arco + manta e o fio. Nas três geometrias, obteve-se uma deformação máxima de 1,8% - foi realizada uma comparação entre elas, de modo que o fio apresente essa deformação máxima de 1,8%.

No que tange os resultados obtidos do ensaio numérico experimental, a primeira análise a ser realizada será dos resultados sobre tensão x deformação x temperatura. Conforme dito no parágrafo anterior, o estudo se estendeu para três geometrias: arco, arco + manta e fio, e o comportamento delas em três temperaturas: 50°C, 70°C e 100°C.

A partir da Figura 38, pode-se perceber que no gráfico tensão x deformação, há uma diferença no nível da tensão e deformação média que foram desenvolvidas nos componentes arco e arco + manta, em comparação com o fio. Tal fato ocorre, em detrimento, do carregamento no fio ser axial e a distribuição da tensão e deformação serem uniformes – justificando com que a tensão e deformação média sejam praticamente iguais às máximas, o que não ocorreu com o arco e arco + manta e por isso a diferença dos valores de deformações e tensões médias entrados.

A curva tensão x deformação a 50°C, ratifica que a deformação máxima no fio foi 1,8%, valor esse bem superior em relação ao arco e o arco + a manta – motivos esses justificados no parágrafo anterior, além do carregamento nesses dois últimos conjuntos citados ter uma menor uniformidade, pois é caracterizado como uma flexão – fazendo com que o fio tenha uma melhor distribuição da tensão.

Ao analisar o gráfico, pode-se inferir que, no primeiro trecho ocorre o carregamento do material até o ponto da reorientação da transformação da martensita maclada em induzida por tensão. O segundo trecho é onde ocorre a deformação termoplástica, chegando até o ponto da tensão máxima e depois ocorrendo o descarregamento do material – onde ocorre uma recuperação da deformação elástica – terminando no ponto final de descarregamento, onde para a temperatura de 50°C ainda não é possível observar a recuperação do material, e tampouco o efeito da memória de forma.

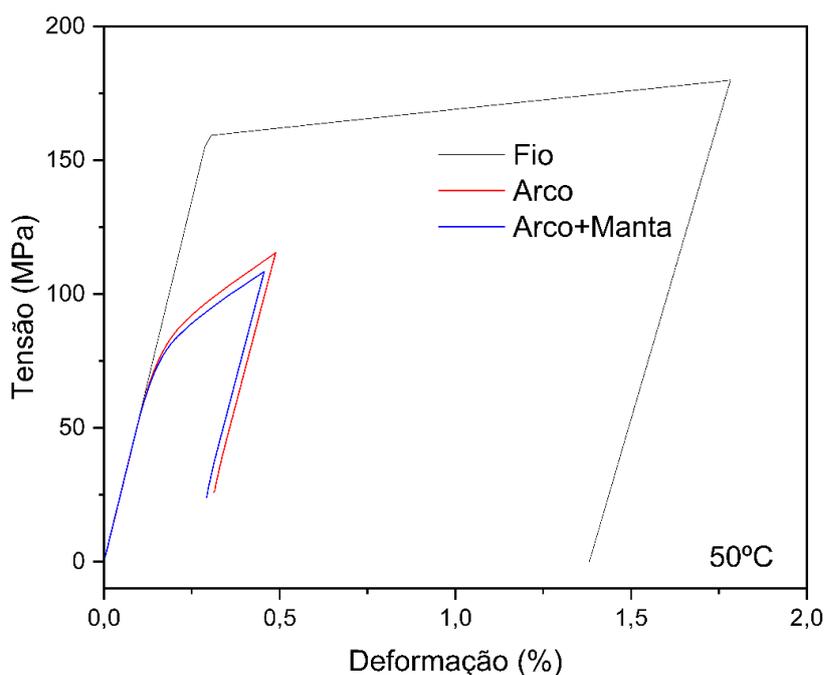


Figura 38 - Curva tensão x deformação x temperatura a 50 °C. Fonte Própria.

Na Figura 39, que aborda o comportamento da tensão x deformação a 70°C, é possível observar que no arco e arco + a manta já se iniciou um processo de recuperação parcial do material onde há um nível de tensão residual presente e o trecho após o ponto que encerra o descarregamento é o de recuperação do material – recuperação essa que ainda não foi completa. Conveniente salientar também que no fio esse processo ainda não teve seu início, tal fato se

justifica pelo motivo que a temperatura de transformação depende do nível de tensão aplicada – e no caso do fio é ainda maior, em detrimento das outras duas geometrias.

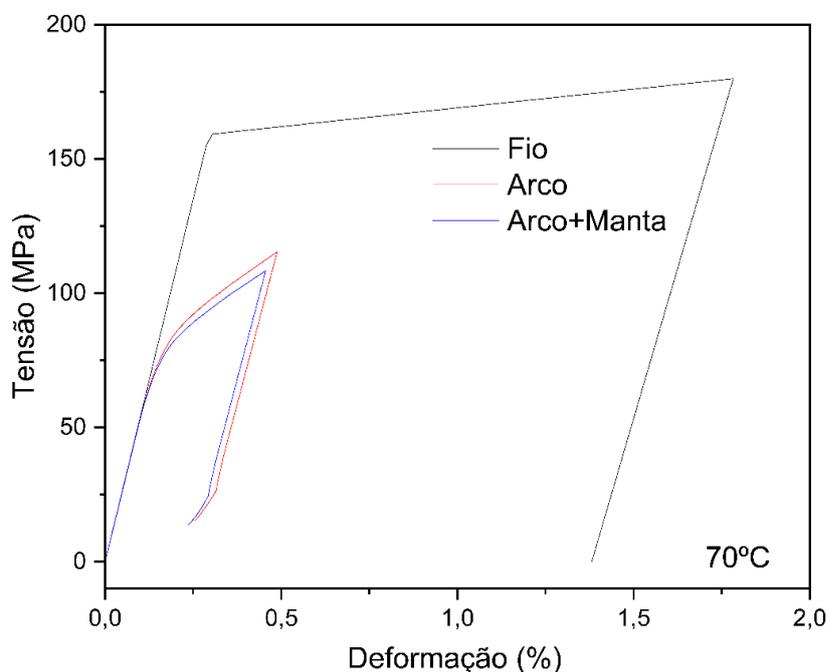


Figura 39 - Curva tensão x deformação x temperatura a 70 °C. Fonte Própria

No último caso, conforme mostra a Figura 40, pode-se inferir que há uma recuperação completa das três geometrias, e o trecho faltante – em relação aos gráficos de 50°C e 70°C – é processo da recuperação completa de cada um dos componentes. Fato esse que reforça o conteúdo abordado no capítulo anterior de memória de forma, em que: o nível de tensão aplicada no material acaba influenciando na temperatura de transição – no caso da tensão x deformação a 70°C, o arco e o arco + manta conseguiu recuperar parte do material em uma tensão mais baixa e o fio, nesse caso, necessitou de uma temperatura maior para realizar a completa transformação.

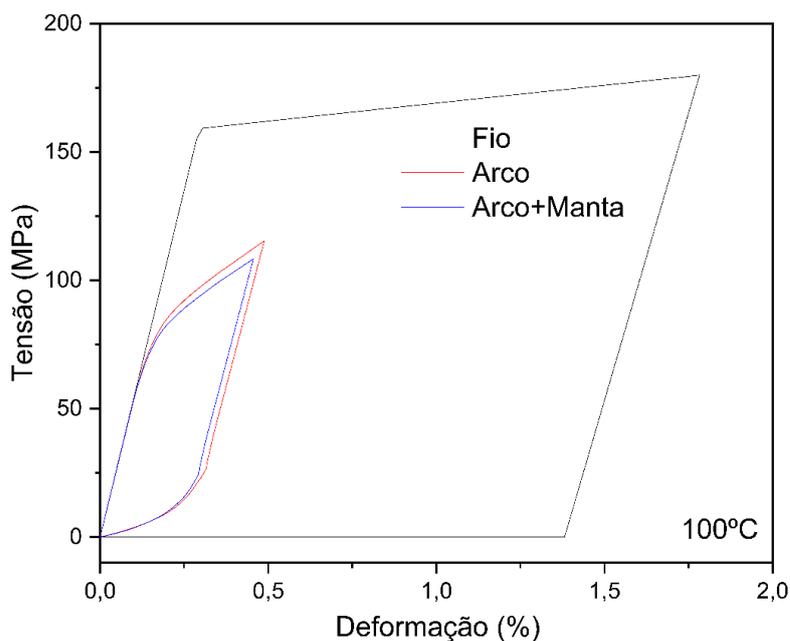


Figura 40 - Curva tensão x deformação x temperatura a 100 °C. Fonte Própria.

6.2. DEFORMAÇÃO X TEMPO X TEMPERATURA

Neste tópico, será abordada a análise da deformação do fio, arco e arco mais a manta em relação ao tempo e à temperatura.

A partir da Figura 41, pode-se observar, de forma clara, as quatro etapas do carregamento, sendo carregamento isotérmico de 25 graus (**Trecho 0→1**) e um descarregamento que representa a fase de recuperação elástica do material (**Trecho 1→2**).

No instante em que o tempo equivale a dois segundos, pode-se observar a deformação residual do material, que por sua vez, trata-se de uma deformação aparentemente plástica (CALLISTER, 2020) visto que o material possui o efeito memória de forma. Essa deformação apenas seria considerada uma deformação plástica caso ela ultrapassasse o nível de tensão crítica.

Dessa forma, a proposta é avaliar o efeito da temperatura recuperando a deformação em três geometrias diferentes.

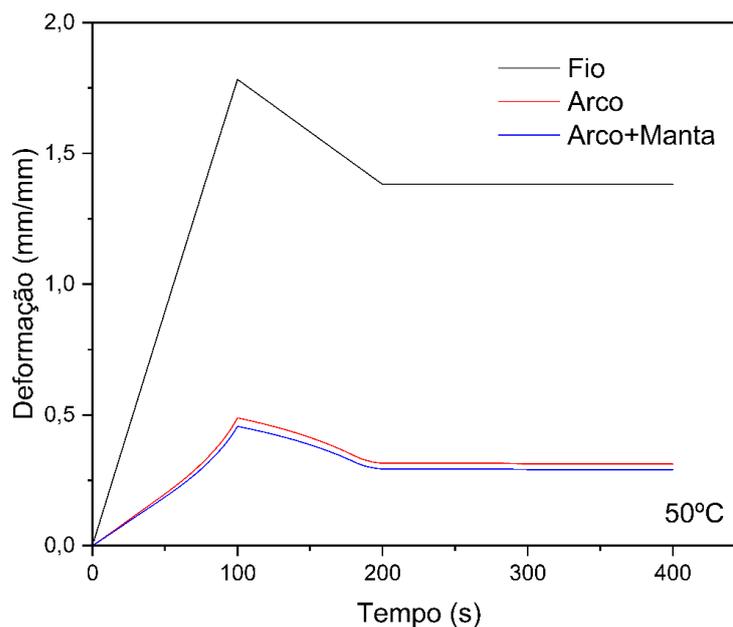


Figura 41 - Curva deformação x tempo x temperatura a 50 °C. Fonte Própria.

Em 50 °C, observa-se que não há recuperação do material em nenhuma das geometrias estudadas. No caso do fio, a justificativa pode ser encontrada no Ensaio de Tração realizado por Monteiro et al. 2016, que por sua vez, obteve, através do DSC, uma temperatura de transformação por volta de 100 °C. No caso do arco e arco mais a manta, ainda não é possível afirmar que a temperatura de 50 °C corresponde a sua temperatura de transformação dado que a análise se baseia no fio;

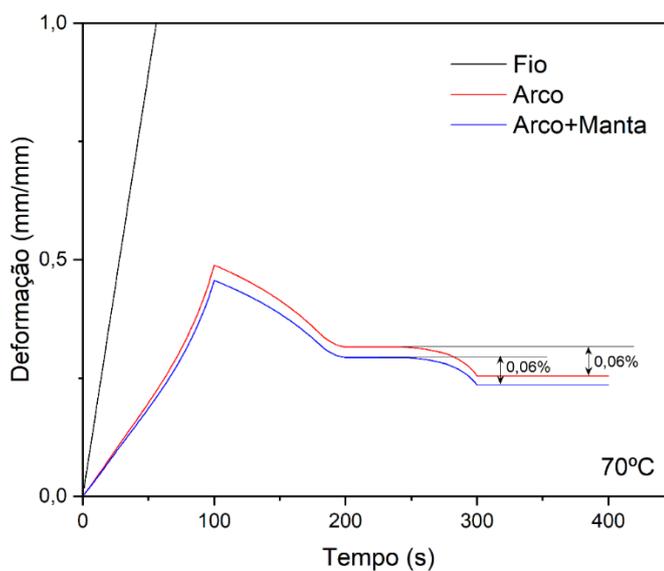


Figura 42 - Curva deformação x tempo x temperatura a 70 °C. Fonte Própria.

Durante o aquecimento a temperatura de 70 °C, observa-se, que durante o carregamento isotérmico (trecho 1→2), a curva da figura X indica o mesmo nível de recuperação apresentado a 50 °C, isto é, a mesma deformação a ser recuperada. Ainda a 70 °C, pode-se observar uma pequena recuperação do arco e arco mais a manta nos valores indicados de 0,06%. Por outro lado, para o fio não foi possível observar um comportamento equivalente à recuperação dado que a temperatura de transformação, a princípio considerada ideal, ainda não foi atingida.

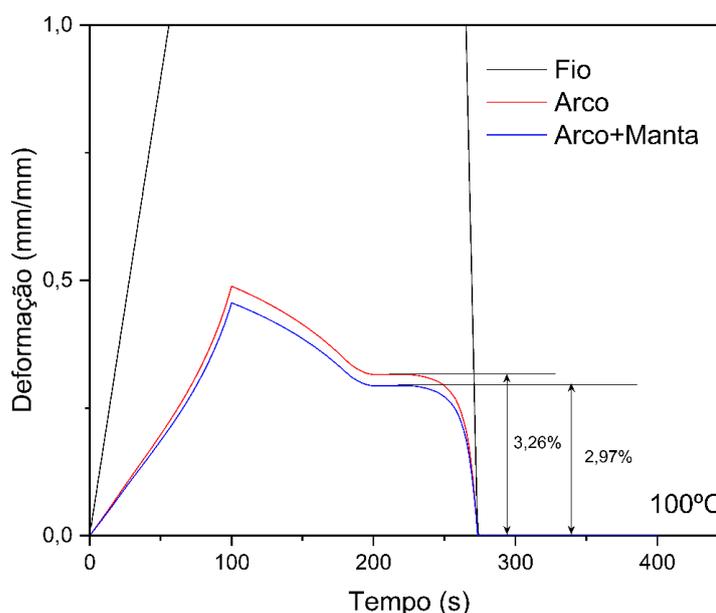


Figura 43 - Curva deformação x tempo x temperatura a 100 °C. Fonte Própria.

Por fim, a uma temperatura de 100 °C, observa-se que as três geometrias foram devidamente recuperadas e, além disso, é possível observar um certo nível de resistência à deformação do arco inserido na manta, o que por sua vez, possivelmente implica que a manta foi capaz de oferecer resistência durante o carregamento mecânico e durante sua recuperação visto que a manta possui uma recuperação levemente menor de 2,97% em relação aos 3,26% para o arco.

6.3. TENSÃO X FRAÇÃO MARTENSÍTICA X TEMPERATURA

Pode-se entender e comparar o comportamento dos resultados de tensão e fração martensítica em função da temperatura para cada uma das geometrias apresentadas a partir do gráfico de tensão x fração martensítica x temperatura.

A partir da Figura 44 pode-se perceber que a tensão crítica para o início da reorientação da fase martensítica ocorre em 50 MPa para o arco com e sem o acoplamento com a manta de Neoprene e em 160 MPa para o fio. Após ser atingido o valor de tensão crítica para mudança de variante para o fio a relação tensão fração é linear, porém, para o arco com e sem acoplamento essa mesma relação é não-linear. Podemos observar que para um aquecimento de 50°C após a remoção do carregamento, a variante induzida por tensão não retorna a variante induzida por temperatura. Isso pois, essa transformação não acontece naturalmente somente é possível através da aplicação de um ciclo térmico apropriado.

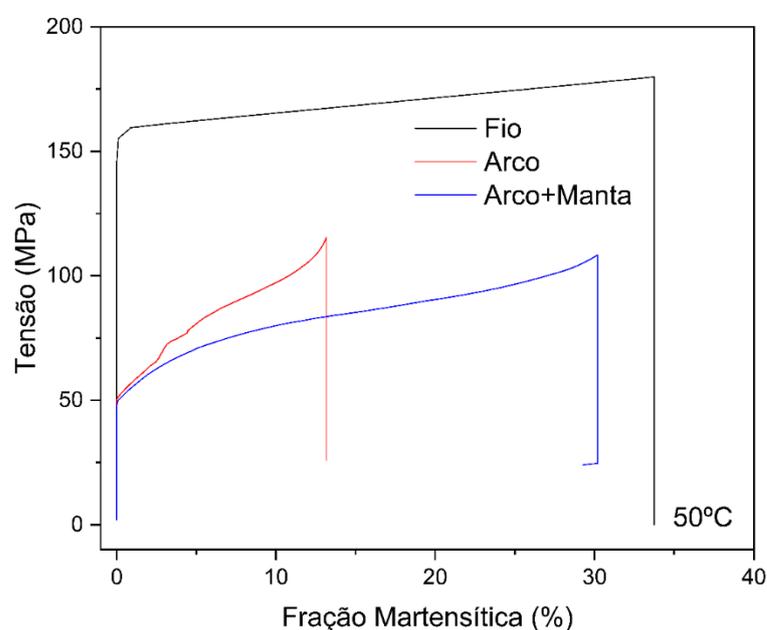


Figura 44 - Gráfico Tensão x Fração Martensítica x Temperatura (50°C). Fonte Própria.

Para 70°C, na Figura 45, é possível notar transformação de fase para o arco e arco acoplado a manta e como consequência uma diminuição da fração martensítica. Para o arco, após o término da fase de descarregamento mecânico têm-se presente no material 13,1 % da variante M^+ sendo esse valor reduzido até 11,8%. Para o arco com acoplamento a manta a fração de M^+ presente é de 30,1% sendo reduzida até 22,7%. E, para o fio não há pode ser observado a mudança de fase.

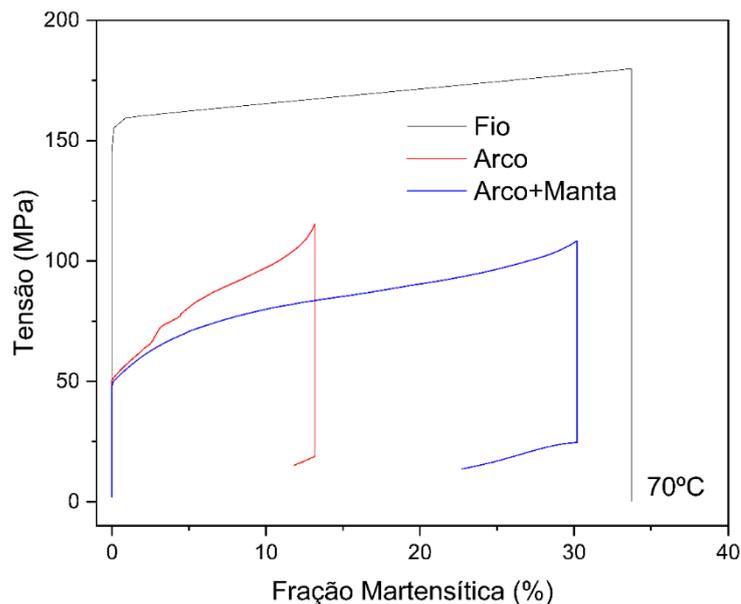


Figura 45 - Gráfico Tensão x Fração Martensítica x Temperatura (70°C). Fonte Própria.

Por fim, na Figura 46, é possível observar a transformação de fase $M^+ \rightarrow A$ para todas as geometrias com um aquecimento máximo de 100°C. Partindo dos valores máximos de 13,1% para o arco 30,1% para o arco com acoplamento ao material hiperelástico e 33,7% para o fio indo até 0%. Significando que toda martensita induzida por tensão na etapa de carregamento mecânico foi transformada em austenita.

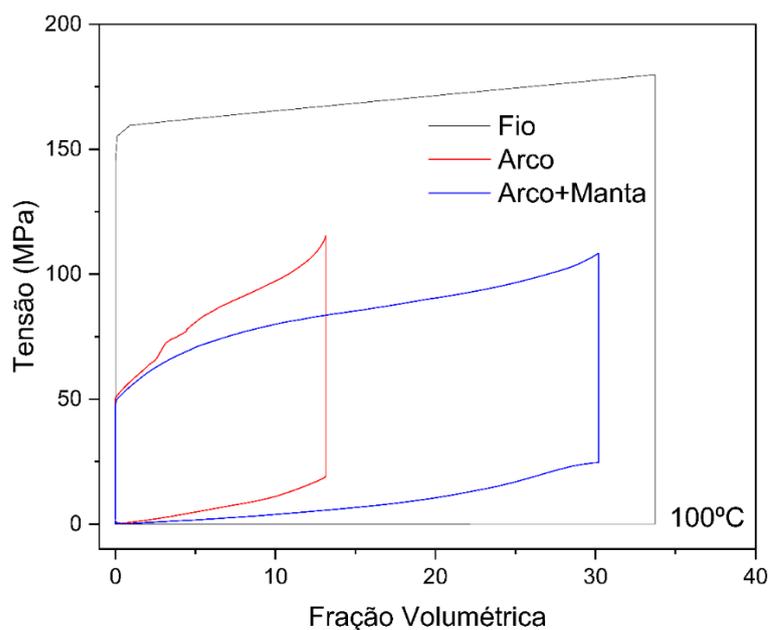


Figura 46 - Gráfico Tensão x Fração Martensítica x Temperatura (100°C). Fonte Própria.

7 CONCLUSÃO

O efeito de memória de forma característico de ligas Ni-Ti é definido pela recuperação da deformação aparentemente plástica. Esse efeito é possibilitado pela transformação martensítica e sua reversão a partir do ciclo térmico. No presente trabalho realizou-se um ensaio numérico por meio de elementos finitos para representar uma matriz hiperelástica com reforço de SMA, visando verificar a viabilidade de utilizar uma manta térmica de isolamento passivo para instalação em tubulações de óleo e gás.

As simulações numéricas foram realizadas no ANSYS fazendo uso do modelo de memória de forma desenvolvido por Auricchio (2001). No qual os parâmetros do modelo numéricos foram calibrados a partir do ensaio experimental realizado por Monteiro et al (2016) e confirmados em uma validação numérico experimental. Esse ensaio foi capaz de representar adequadamente os resultados do ensaio experimental e do comportamento de uma SMA.

O projeto da manta foi desenvolvido a fim de avaliar as características termomecânicas do fio a partir de análises estáticas não-lineares. As condições de suporte do modelo se mostraram de extrema importância para a execução do ensaio, bem como as condições de contato. Fato apresentado no presente trabalho onde se mostrou a influência do engaste e pivotamento. Para as condições de contato, observa-se ser interessante a iteração do projeto no ANSYS para estudar os efeitos das condições de contato nos resultados. Atentando-se que essas condições de contato influenciam na não-linearidade do modelo.

Os resultados mostraram que fio com 2 mm de diâmetro em formato “C” acoplado à manta térmica, possui resistência suficiente para suportar a matriz na posição deformada. Houve um aumento considerável na fração martensítica, quando comparado com o arco sem acoplamento, promovendo uma boa capacidade de recuperação da deformação. Outro fato que pode ser observado é que a matriz de borracha de Neoprene não ofereceu grande resistência à deformação e recuperação durante o aquecimento. Podendo ser necessário o estudo de outros materiais comerciais utilizados em equipamentos offshore como camadas de espumas utilizadas em tubos flexíveis.

O ensaio numérico com o reforço de 1 mm de diâmetro também mostrou ser capaz de suportar mecanicamente a matriz. Isso se faz positivo para o projeto, visto a necessidade de se realizar um protótipo em escala reduzindo assim o seu custo.

Como sugestão de trabalhos futuros podem ser indicados:

- Realização de ensaio experimental de flexão do arco, visando a validação dos resultados a partir da calibração do parâmetro de Lode;
- Estudo sobre o efeito térmico da manta sobre uma tubulação em operação, para estimar sua espessura;
- Desenvolvimento do protótipo de uma manta com reforço SMA para análise do comportamento do dispositivo.

8 BIBLIOGRAFIA

ALAZZAWI, S.; FILIP, P. Modeling the transient behavior of the NiTi shape memory actuator using finite element analysis: Parametric study of the rate effects. Department of Mechanical Engineering and Energy Processes, **Southern Illinois University**, Carbondale, IL, 62901, USA. Department of Mechanical Engineering, **University of Diyala**, Diyala, 10061, Iraq, 2019.

ANSYS INC., "Element Reference", Release 21, 2021.

ANSYS INC., "Material Reference", Release 21, 2021.

ANSYS INC., "Structural Analysis Guide", Release 21, 2021.

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

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

AZOUZI, M. Optimization based simulation of self-expanding Nitinol stent. **Materials & Design**, v.50, p.12, Birmingham, 2013.

BEWERSE, C.; BRINSON, L.C.; DUNAND, D.C. NiTi with 3D-interconnected microchannels produced by liquid phase sintering and electrochemical dissolution of steel tubes. **Journal of Materials Processing Technology**, v.214, p.1985-1899, Evanston, 2014.

BEZERRA SILVA, A.C. Influência da taxa de deformação nas propriedades termomecânicas de ligas Cu-Al-Be-Nb-Ni com memória de forma, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13376/1/ACBS06112018.pdf>>. Acesso em outubro de 2021.

BISCHOFF, J. E.; ARRUDA, E. M.; GROSH, K. Finite element simulations of orthotropic hyperelasticity. Bioengineering Institute, Department of Engineering Science, **University of Auckland**, Auckland and Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, **University of Michigan**, Ann Arbor, 2002.

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

CHAGAS, K.W. Estudo da Formação de Hidratos em Linhas de Escoamento de Gás Natural, 2016. Disponível em < <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/26933>> Acessado em outubro de 2021.

DESROCHES, R.; McCORMICK, J.; DELEMONT, M. Cyclie propoerties of superelastic shape memory alloy wires and bars. **Journal of Structural Engineering**, v.120, n.1, p.38-46, 2004.

DESROCHES, R.; SMITH, B. Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of their potential and limitations. **Journal of Earthquake Engineering**, v. 7, 3, 2003, p.1-15.

DUERIG, T.; PELTON, A.; STOECKEL, D. An overview of Nitinol medical applications. **Materials Science & Engineering**, p. 149-160, Freemont, 1999.

FERNANDES, F.M.B. Ligas com memória de forma. **Departamento de Ciência dos Materiais**; CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa, 2003.

GAC, P. L.; CHOQUEUSE, D.; MELOT, D.; MELVE, D.; MENICONI, L. Life time prediction of polymer used as thermal insulation in offshore oil production conditions: Ageing on real structure and reliability of prediction. Ifremer, Laboratoire Comportement des Structures en Mer, Centre de Brest, CS 10070, **F-29280 Plouzané**, France. TOTAL SA, DGEP/DEV/TEC/COR/22D67, 2 place de la Coupole, F-92078 Paris La Defence 6, France. Statoil, RDI, **N-7005 Trondheim**, Norway. PETROBRAS/CENPES, **Research & Development Center**, Cidade Universitaria, Ilha do Fundao, Rio de Janeiro – RJ, Brazil. *Polymer Testing* 34, 2014.

GODOI, R. P. Estudo e caracterização da Liga Nitinol. Departamento Acadêmico de Engenharia dos Materiais; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

HUMBEECK, J.V. Non-medical applications of shape memory alloys. **Materials Science & Engineering**, p.134-140, Heverlee, 1999.

JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A. GIBSON, M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. **Materials and Design**, v.56, p.1078-1113, 2014.

JOHNSON MATTHEY MEDICAL COMPONENTS. Comparison of properties of Nitinol and stainless steel. Disponível em: < <http://jmmedical.com/resources/231/Comparison-of-Properties-of-Nitinol-and-Stainless-Steel.html>>. Acesso em outubro 2021.

KAUFFMAN, G.; MAYO, I. The story of Nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications. **Chem Educator**, v.2, p. 1-21, 1997.

KRENTZMAN A.; ROBINSON, E.; JESTER, J.; PERRON, B. Heat Maps: a technique for classifying and analyzing drinking behavior. **Substance Use & Misuse**, 46, 687–695, 2011.

KRISHNAN, R.V; DELAERY, L.; WARLIMONT, H. Thermoelasticity pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations, Part 1 Structural and microstructural changes. **Journal of Materials Science**, v. 0, p.1521-1535, 1974.

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

MARTÍNEZ, R.S., 2001. Caracterización de aleaciones base ni-ti producidas por solidificación rápida (melt-spinning). Tese D. Sc., Universitat de les Illes Balears, Illes Balears, Espanha.

MATINS, V. Estudo norteia a estampagem de peças médicas em ligas de níquel-titânio. **Corte & Conformação de Metais**, Porto Alegre, p.4-16, 2009).

MELTON, K.N. General applications of SMA's and smart materials. In: OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. **Shape Memory Materials**. New York: Cambridge, 1998.

MIYAKAZI, S.; IMAI, T; IGO, I; OTSUKA, K. Effect of cyclic deformation on the pseudoelasticity characteristics of Ti-Ni alloys. **Metallurgical Transactions**, v.17, p.115-120, 1986.

MOALLEMI, A.; BAGHANI, M.; ALMASI, A.; ZAKERZADEH, M. R.; BANIASADI, M. Large deformation and stability analysis of functionally graded pressure vessels: An analytical and numerical study, **J Mechanical Engineering Science**, 2017.

MONTEIRO, P.C.C., Análise do acoplamento termomecânico em ligas com memória de forma. Tese D. Sc.; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

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.

MONTEIRO, P.C.C., Desenvolvimento de um Sistema Ativo de Isolamento Térmico para Tubulações Submarinas baseado em Materiais Inteligentes; **Proposta FAPERJ de Auxílio ao Pesquisador**, 2019.

MORGAN, N. B. Medical shape memory alloy applications-the market and its products. **Materials Science and Engineering**, v.378, p. 16-23, 2004.

MOSKOWITZ, H.; REISNER, M.; LAWLOR, J.; DELIZA, R. Packaging research in food product. **Design and development**, Iowa: Wiley-Blackwell, 2009

OLSON, G.B.; COHEN, M. Theory of martensitic nucleation: a current assessment. Proceeding Internacional Conference on Solid-Solid Phase Transformations, p.1145-1163, 1982.

OTSUKA, K.; REN, X. Recent developments in the research of shape memory alloys. **Intermetallics**, 7, pp. 511-528, 1999.

OTSUKA, K.; SHIMIZU, K. Pseudoelasticity and shape memory effects in alloys, **International Metals Reviews**, v. 31, n. 3, p. 93-114, 1986.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. Shape memory materials. **Cambridge University Press**, 1998.

PRYKE A.; MOSTAGHIM S.; NAZEM, A. Heat Map visualization of population based multi objective algorithms. In: OBAYASHI S. et al (eds.). **Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 4th International Conference EMO 2007**, p. 361–375, Matshushima, 2007.

REIS, W.P. Caracterização de ligas níquel titânio para ortodontia. Dissertação de Mestrado (Ciência dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2001.

REIS, P. K. P. Desenvolvimento e calibração de modelos tridimensionais em elementos finitos para aplicações em ligas de memória de forma, **COPPE UFRJ**, Rio de Janeiro, 2014.

RHYANEN, J. Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy. **Faculty of Medicine**, Oulu University, Finlândia, 117p. 1999.

ROGERS, C.A. Intelligent materials systems: the Dawn of a new materials age. Journal of Intelligent Materials System and Structures, v. 4, **Technomic Publishing Company**, Lancaster, U.S.A., 1993.

SANTOS, B.D.; Modelagem de estruturas treliçadas com elementos com ligas com memória de forma utilizando o método de elementos finitos. Trabalho de Conclusão de Curso, 2017.

SONG, G.; MA, N.; LI, H.N. Applications of shape memory alloys in civil structures. **Engineering Structures**, p. 1266-1274, Houston, 2006.

STOECKEL, D. Fabrication and properties of nickel-titanium shape memory alloys wires. **Wire Journal International**, p.30-40, 1989.

TANI, J.; TAKAGI, T.; QIU, J. Intelligent material systems. **Application of functional materials**, 1998.

URBINA, C.; FLOR, S.D.; FERRANDO, F. Effect of thermal cycling on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys. **Materials Science and Engineering**, v.501, p.197-206, 2009.

VILLARINHO, D.J. Caracterização parcial da liga Nitinol atuador através de pontos críticos de transformação de fases utilizando calorimetria diferencial de varredura. **Estudos Tecnológicos**, Porto Alegre, 2010.