



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

PEDRO PAULO DOS SANTOS LIMA

**PROJETO CONCEITUAL DE *SPRINKLER* REUTILIZÁVEL PARA COMBATE A
INCÊNDIO COM ATUADOR DE LIGA NITI COM EFEITO MEMÓRIA DE
FORMA**

MOSSORÓ-RN

2023

PEDRO PAULO DOS SANTOS LIMA

**PROJETO CONCEITUAL DE *SPRINKLER* REUTILIZÁVEL PARA COMBATE A
INCÊNDIO COM ATUADOR DE LIGA NITI COM EFEITO MEMÓRIA DE
FORMA**

Dissertação de Mestrado apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção de título de
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Zoroastro Torres Vilar, Prof. Dr.
Co-orientador: Fabrício José Nobrega
Cavalcante, Prof. Dr.

MOSSORÓ-RN

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

LL474 Lima, Pedro Paulo Dos Santos.
p PROJETO CONCEITUAL DE SPRINKLER REUTILIZÁVEL
PARA COMBATE A INCÊNDIO COM ATUADOR DE LIGA NITI
COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA / Pedro Paulo Dos
Santos Lima. - 2023.
96 f. : il.

Orientador: Zoroastro Torres Vilar.
Coorientador: Fabrício José Nobrega Cavalcante.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2023.

1. Sprinklers. 2. Combate a incêndio. 3. Ligas
NiTi. 4. reutilização. 5. memorização de forma. I.
Vilar, Zoroastro Torres , orient. II. Cavalcante,
Fabrício José Nobrega, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO PAULO DOS SANTOS LIMA

**PROJETO CONCEITUAL DE *SPRINKLER* REUTILIZÁVEL PARA COMBATE A
INCÊNDIO COM ATUADOR DE LIGA NITI COM EFEITO MEMÓRIA DE
FORMA**

Dissertação de Mestrado apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção de título de
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Defendida em: 31/08/2023.

BANCA EXAMINADORA

ZOROASTRO TORRES Assinado de forma digital por
ZOROASTRO TORRES
VILAR:04417246475 VILAR:04417246475
Dados: 2023.09.01 10:03:59 -03'00'

Zoroastro Torres Vilar, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Documento assinado digitalmente
FABRICIO JOSE NOBREGA CAVALCANTE
Data: 01/09/2023 10:21:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fabício José Nobrega Cavalcante, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Documento assinado digitalmente
Andre Fellipe Cavalcante Silva
Data: 01/09/2023 10:48:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

André Fellipe Cavalcante Silva, Prof. Dr. (IFPB)
Membro Examinador Externo



Documento assinado digitalmente
ROMULO PIERRE BATISTA DOS REIS
Data: 01/09/2023 11:10:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rômulo Pierre Batista dos Reis, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico esse trabalho aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, a minha avó Vilani que sempre se orgulhou dessa minha busca pelo conhecimento e ao meu falecido avô José Salvador, que certamente estaria muito orgulhoso e feliz nesse momento (In Memoriam). E a minha esposa que esteve comigo em todos os momentos ao longo dessa jornada do mestrado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao nosso DEUS, nosso criador que me concedeu trilhar mais alguns passos nessa Universidade grandiosa que é a UFERSA. Possibilitando a obtenção de mais um título importante que foi o mestrado.

Agradeço aos meus pais, Joseneide Dos Santos Lima e Luiz de Paiva Lima, por me concederem a vida, o cuidado, o amor e especialmente a educação necessária para que eu chegasse a ser o que sou hoje.

Agradeço a minha irmã Jéssica Monique Dos Santos Lima por sempre estar ao meu lado quando precisei, sempre ajudando no que fosse necessário.

Agradeço a minha esposa Adriana Fonseca Mendes Dos Santos por estar ao meu lado em todos os momentos, me ajudando a superar todas as barreiras, todos os problemas e ser minha perfeita auxiliadora em tudo.

Agradeço ao meu orientador, o Pr. Dr Zoroastro Torres Vilar e ao meu Co-orientador, Pr. Dr Fabrício José Nobrega Cavalcante por me auxiliarem na realização desse trabalho, orientando sempre da melhor forma possível os rumos da pesquisa.

Agradeço também a participação da banca examinadora presente, que sabidamente é composta de profissionais bastante capacitados que só tem a acrescentar ao trabalho com as devidas correções e ponderações.

RESUMO

Os acidentes são caracterizados por eventos inesperados que resultam em danos físicos, emocionais ou materiais. Estes podem ocorrer de variadas maneiras como: acidentes de trânsito, acidentes de trabalho, domésticos, dentre outros. Analisando as diversas causas e fatores preventivos que contribuem para ocorrência dos sinistros os incêndios ganham destaque, sendo esses de fonte natural ou criminosa. Caso não tomadas as medidas de precaução e combate necessárias, conseguem apresentar um grande potencial destrutivo, podendo causar prejuízos variados desde os econômicos, estruturais e históricos até o principal, a perda de vidas humanas. Pensando em minimizar ou extinguir esses efeitos, várias medidas são tomadas como: plano de prevenção de combate a incêndio, sinalização, descarte adequado de produtos com risco potencial, manutenções periódicas em redes elétricas, dentre outros. Considerando as diversas medidas importantes utilizadas destacam-se os sistemas de detecção e combate imediato de incêndio, dos quais podemos citar o sistema de chuveiros automáticos instalados em edificações “*Sprinklers*”. Esses equipamentos são regidos pela NBR 10897 e possuem fundamental importância no primeiro combate ao foco do incêndio, de forma a controlar a situação até a chegada da equipe de combate a incêndio. Analisando a grande maioria dos atuais sistemas que utilizam *Sprinklers* pode ser observada uma problemática, pois um dos componentes de acionamento, a ampola de vidro de contenção da válvula de água, se rompe para liberação da água pressurizada, fazendo assim que o *sprinkler* seja não reutilizável. Pensando nesse ponto que o referido estudo buscou projetar um sistema de chuveiros automáticos que pudessem ser reutilizados, diminuindo assim o custo relacionado com a sua substituição ao ser acionado, para isso o trabalho buscou elencar possíveis materiais inteligentes que pudessem ser aplicados como atuadores, dentre eles os que se destacaram as ligas NiTi, que possuem características especiais de memorização de forma de acordo com a temperatura apresentada, dessa forma estes puderam ser os atuadores adequados para permitir essa reutilização do componente, pois apresentaram uma transformação de fase de martensita para austenita final a 66 °C, de acordo com a norma NBR 10897, e geração de força necessária para serem utilizados como atuadores termomecânicos.

Palavras-chave: *Sprinklers*, Combate a incêndio, Ligas NiTi, reutilização, memorização de forma.

ABSTRACT

Accidents are characterized by unexpected events that result in physical, emotional or material damage. These can occur in a variety of ways, such as: traffic accidents, work accidents, domestic accidents, among others. Analyzing the various causes and preventive factors that contribute to the occurrence of accidents, fires stand out, whether they are of natural or criminal origin. If the necessary precautionary and combat measures are not taken, they can present a great destructive potential, causing various losses, from economic, structural and historical to the main one, the loss of human life. Thinking about minimizing or extinguishing these effects, several measures are taken such as: fire prevention plan, signage, adequate disposal of products with potential risk, periodic maintenance on electrical networks, among others. Considering the various important measures used, fire detection and immediate fire fighting systems stand out, of which we can mention the automatic shower system installed in “Sprinkler” buildings. This equipment is governed by NBR 10897 and is of fundamental importance in the first fight against the source of the fire, in order to control the situation until the arrival of the fire fighting team. Analyzing the vast majority of current systems that use sprinklers, a problem can be observed, as one of the actuating components, the water valve containment glass ampoule, breaks to release the pressurized water, thus making the sprinkler non-reusable. Thinking about this point, the aforementioned study sought to design an automatic shower system that could be reused, thus reducing the cost related to its replacement when activated, for this the work sought to list possible intelligent materials that could be applied as actuators, among them the ones that stood out were NiTi alloys, which have special characteristics of shape memorization according to the temperature presented, thus these could be the appropriate actuators to allow this reuse of the component, as they presented a phase transformation from martensite to final austenite to 66 °C, in accordance with the NBR 10897 standard, and generation of force necessary to be used as thermomechanical actuators.

Keywords: Sprinklers, Fire Fighting, NiTi Alloys, reuse, shape memorization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Triângulo do fogo.....	18
Figura 2	Tetraedro do fogo	18
Figura 3	Pontos de Combustão.....	20
Figura 4	Classes de incêndio relacionadas a cada extintor.....	23
Figura 5	Hidrante de coluna.....	25
Figura 6	Hidrante de parede.....	26
Figura 7	Hidrante industrial.....	26
Figura 8	Cores de bulbos de vidro.....	27
Figura 9	Comparação entre o combate a incêndio de ambientes com e sem <i>sprinklers</i>	28
Figura 10	Componentes de um chuveiro automático.....	29
Figura 11	Visão geral de um sistema de combate a incêndio.....	30
Figura 12	Cerâmicas piezoelétricas.....	31
Figura 13	Ponte Pênsil, China. Um par de amortecedores MR foi colocado em cada um dos cabos de aço de sustentação.....	32
Figura 14	Transformação LMF em liga NiTi.....	34
Figura 15	Esquematização do EMFS.....	35
Figura 16	Esquematização do efeito memória de forma duplo ou bidirecional.....	36
Figura 17	Configurações do experimento de flexão da LMF.....	40
Figura 18	Atuador fabricado em impressora 3D com utilização de fios Flexinol.....	41
Figura 19	Efeitos das diferentes fases do ciclo de vida sobre o custo do produto.....	41
Figura 20	Etapas do projeto segundo Coryell.....	43
Figura 21	Comparação das mudanças de projeto entre uma empresa norte americana (sem QFD) e uma empresa japonesa (com QFD).....	45
Figura 22	Fluxograma de execução do projeto de dimensionamento de <i>Sprinkler</i> reutilizável através de ligas NiTi LMF.....	47
Figura 23	Preparação das amostras NiTi para ensaio de têmpera.....	49
Figura 24	Realização de ensaio de têmpera em forno tipo mufla (GP Científica).....	50
Figura 25	Microsoldadora KERNIT, SMP 3000 GOLD.....	51
Figura 26	Arranjo das amostras preparadas para o RET.....	51
Figura 27	Sistema de aquisição de dados e RET.....	52
Figura 28	Amostras mergulhadas no banho ultratermostático.....	53
Figura 29	Ensaio de geração de força para as amostras RET 549,75 °C a 25,68 min.....	55

Figura 30	Ensaio de tração para as amostras RET 549,75 °C a 25,68 min.....	55
Figura 31	Modelagem de dispositivo <i>Sprinkler</i> acionado por fio NiTi.....	59
Figura 32	Ensaio RET de amostra tratada termicamente a 400 °C, duração 25 min.....	61
Figura 33	Ensaio RET de amostra tratada termicamente a 500 °C, duração 15 min.....	61
Figura 34	Ensaio RET de amostra tratada termicamente a 400 °C, duração 25 min (retas tangentes).....	63
Figura 35	Planejamento codificado das amostras com os resultados obtidos dos ensaios RET.....	65
Figura 36	Diagrama de Pareto com as temperaturas martensíticas (a) inicial e (b) final; e austeníticas (c) inicial e (d) final.....	66
Figura 37	Superfície de resposta das amostras obtidas através do diagrama de pareto com as temperaturas martensíticas (a) inicial e (b) final; e austeníticas (c) inicial e (d) final.....	68
Figura 38	Iterações em <i>excel</i> para obtenção de parâmetro para o desenvolvimento do <i>sprinkler</i> NiTi.....	71
Figura 39	Ensaio RET amostra 549,75 °C e duração de 25,68 min.....	71
Figura 40	Ensaio de tração para amostras martensíticas (Temperatura ambiente).....	73
Figura 41	Ensaio de tração para amostras Austeníticas.....	74
Figura 42	Notícias de incêndios estruturais por ano.....	75
Figura 43	Sequência de funcionamento do projeto conceitual.....	76
Figura 44	Projeto finalizado <i>Sprinkler</i> NITI – memória de forma.....	77
Figura A1	Modelagem de dispositivo <i>Sprinkler</i> acionado por fio NiTi.....	87
Figura A2	Informações do material junto ao fabricante.....	88
Figura A3	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 350 °C com duração de 15 min.....	89
Figura A4	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 350 °C com duração de 20, 25 e 30 min.....	89
Figura A5	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 400 °C com duração de 15, 20, 25 e 30 min.....	90
Figura A6	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 450 °C com duração de 15, 20, 25 e 30 min.....	90
Figura A7	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 500 °C com duração de 15, 20, 30 min.....	91

Figura A8	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 500 °C com duração de 25 min.....	91
Figura A9	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 550 °C com duração de 15 min.....	92
Figura A10	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 550 °C com duração de 20 e 30 min.....	92
Figura A11	Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 550 °C com duração de 25min.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificações de <i>sprinklers</i>	28
Tabela 2	Comparação comercial e potencial da atuação de alguns materiais ativos.....	38
Tabela 3	Temperaturas de transformação de fases obtidas por ensaios RET.....	63
Tabela 4	Ensaio de geração de força de deformação 0,2 %.....	72
Tabela 5	Rigidez da liga NiTi.....	74
Tabela 6	Levantamento de custos do projeto.....	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Matriz de escolha de atuadores termomecânicos.....	57
Quadro 2	Matriz QFD do <i>Sprinkler</i> por atuação de liga NITL.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Desenvolvimento e propagação de incêndios.....	17
2.1.1	Triângulo e Tetraedro do Fogo.....	17
2.1.2	Processos de decomposição e pontos notáveis da combustão.....	19
2.1.3	Propagação de calor.....	20
2.1.4	Formas de controle e extinção do fogo.....	21
2.1.5	Classificações de incêndios.....	21
2.1.6	Medidas aplicáveis à segurança de incêndio.....	23
2.1.7	Chuveiros Automáticos (<i>Sprinklers</i>).....	26
2.2	Atuadores não convencionais.....	30
2.2.1	Cerâmicas piezoelétricas.....	30
2.2.2	Fluidos Reológicos.....	31
2.2.3	Fluidos magneto-reológicos.....	32
2.2.4	Ligas com efeito memória de forma (LMF).....	33
2.3	Características gerais das ligas com efeito memória de forma (LMF).....	34
2.3.1	Efeito memória de forma unidirecional (simples) (“One-Way Shape Memory Effect”).....	34
2.3.2	Efeito memória de forma bidirecional (“Two-Way Shape Memory Effect”).	35
2.3.3	Superelasticidade.....	36
2.3.4	Efeito de amortecimento.....	36
2.3.5	Ligas Níquel-Titânio (NiTi).....	37
2.4	Influência do tratamento térmico nas temperaturas de transição de fase de ligas LMF.....	39
2.5	Aplicações das ligas LMF como atuadores.....	39
2.5.1	Impressão 4D para o desenvolvimento de atuadores com o a utilização de LMF.....	39

2.5.2	Fabricação aditiva de estruturas Compostas Inteligentes Baseadas em Fios Flexinol.....	40
2.4.4	Análise mecânica dinâmica (DMA).....	38
2.6	Gerenciamento e metodologia de projeto.....	41
2.6.1	Projeto de produtos segundo Coryell.....	42
2.6.2	Matriz de escolha ou decisão.....	43
2.6.3	Matriz QFD.....	44
2.7	<i>Sprinkler</i> com princípio de efeito memória de forma.....	45
3	METODOLOGIA.....	47
3.1	Desenvolvimento do produto.....	47
3.1.1	Etapas de modelagem do projeto.....	48
3.2	Materiais e métodos.....	48
3.2.1	Preparação das amostras.....	48
3.2.2	Caracterização das Amostras NiTi LMF.....	49
3.2.3	Ensaio de RET (resistência elétrica x temperatura).....	50
3.2.4	Planejamento experimental das amostras.....	53
3.2.5	Realização do tratamento térmico ideal para o sprinkler termomecânico.....	54
3.2.6	Ensaio de Geração de força, deslocamento e tração.....	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	Matriz de escolha.....	57
4.2	Matriz QFD.....	57
4.3	Modelagem do protótipo.....	59
4.4	Ensaio RET para caracterização das amostras.....	60
4.5	Planejamento codificado das amostras.....	65
4.6	Definição de tratamento térmico ideal para a aplicação de <i>sprinkler</i> termomecânico.....	70
4.7	Resultados do ensaio de geração de força.....	71
4.8	Resultados do ensaio de deformação recuperável.....	72
4.9	Ensaio de tração para amostras martensíticas e austeníticas.....	73
4.10	Tabela de custos do projeto.....	74
4.11	Projeto Conceitual.....	75
4.12	Funcionamento do projeto finalizado – <i>Sprinkler</i> NITI.....	76
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	78

REFERÊNCIAS.....	79
ANEXO A.....	87

1 INTRODUÇÃO

A descoberta do fogo pelo homem trouxe condições essenciais para que ele sobrevivesse e evoluísse, entretanto, numa via de mão dupla, o fogo é um dos nossos principais inimigos em casos adversos. Assim, sabe-se que a importância da segurança contra incêndios é uma das primeiras preocupações a se considerar nos projetos arquitetônicos (FRANCO, 2019).

Partindo do princípio dessas ideias é importante frisar que todos os preceitos apresentados norteiam e embasam todo o projeto de uma edificação, podendo ser considerado como o primeiro passo para reduzir o risco de incêndio, pois nele já se pode precipitar e, evidentemente, colaborar para a redução das cargas de incêndio e de fumaça, tanto avaliando sua estrutura, seus elementos de vedação e materiais de acabamento, quanto considerando seu conteúdo (FRANCO, 2019).

A redução das cargas de propagação e ignição de incêndios visa mitigar e isolar os possíveis agentes que possam vir a causar o acidente, essas formas de combate podem se apresentar tanto de forma individual, quando agem sobre um dos componentes do triângulo do fogo, ou de forma interligada, quando agem sobre mais de um elemento. No que se refere as formas disponíveis de combate e prevenção de incêndios, ambas focam em tentar eliminar ou diminuir as possíveis causas originadoras da trindade do fogo: combustível (material que pode entrar em combustão – madeira, papel, tintas, e etc), comburente (qualquer substância capaz de oxidar um combustível numa reação rápida e exotérmica, o comburente mais conhecido é o oxigênio) e a temperatura de ignição (temperatura que provoca a combustão/queima do combustível). Para isso são utilizados principalmente meios de prevenção: treinamento do pessoal em técnicas de combate preliminar, revisão periódica de quadros elétricos, sistemas de sinalização e *sprinklers*.

Em se tratando dos chuveiros automáticos, *Sprinklers*, esses são equipamentos aspersores de água pulverizada sobre o foco inicial do incêndio. Na maioria dos casos, o principal efeito de aplicação da água na extinção de um incêndio é o arrefecimento. Este efeito é tanto mais importante, quanto maior for a superfície exposta da água face ao seu volume, isto é, quanto mais finamente pulverizada estiver. Porém a aplicação da água pulverizada só é eficaz quando o incêndio se desenvolve com uma intensidade suficientemente baixa que possibilite a incidência direta das partículas de água sobre a matéria a arder (DA SILVA, 2012).

Em relação ao seu funcionamento, estes são compostos por bulbos termossensíveis de vidro, que se rompem para liberação da água pulverizada de acordo com a temperatura para a qual foi projetada, podendo variar de 57 a 260 °C. Analisando esse mecanismo conseguimos

encontrar um certo ponto negativo na maioria dos chuveiros automáticos comercialmente utilizados, pois ao se romper esse bulbo, o chuveiro precisaria ter seu componente repostado e resetado para uma posterior utilização. Dessa maneira o presente estudo visualizou essa problemática e idealizou um mecanismo que pudesse ser reutilizável, fazendo com o que o *Sprinkler* adquirisse uma característica de funcionamento contínuo, dando assim maior praticidade e versatilidade de aplicações. Para isso, o trabalho se utilizou dos materiais inteligentes, mais precisamente as ligas NiTi com efeito memória de forma (*Shape memory Alloy*). Geralmente estes materiais podem ser facilmente deformados plasticamente a uma temperatura relativamente baixa (fase martensita) e ao serem expostos a uma temperatura mais elevada (fase austenítica), retomam a forma inicial (OTSUKA E WAYMAN, 1998). Com isso, os fios Niti apresentam a característica de atuadores termomecânicos, sendo elementos que podem substituir o atual sistema de bulbo termossensível.

1.1 Justificativa

O estudo e desenvolvimento acerca desse tema busca adquirir uma resolução que apresente um custo-benefício mais adequado no que tange aos mecanismos de chuveiros automáticos, também conhecidos como *sprinklers*. Esses dispositivos apresentam uma grande importância no combate à incêndio, principalmente na sua fase inicial, permitindo que o fogo possa ser controlado e facilite as ações posteriores de combate e erradicação do incêndio. Porém, a maioria dos sistemas de *sprinklers*, hoje existentes, apresentam a deficiência de necessidade de troca do componente após seu uso, encarecendo assim o processo. Segundo essa perspectiva, a proposta vem sanar essa problemática, desenvolvendo um sistema reutilizável e que apresente um custo-benefício relevante ao setor. De forma que a reutilização do componente consiga evitar as várias reposições dos atuais modelos de *sprinklers*, quando em aplicação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- Desenvolver um projeto conceito de chuveiro automático, *Sprinkler*, que possa ser reutilizável através do uso de ligas com efeito memória de forma NiTi.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver o projeto conceitual do *Sprinkler*;
- Desenvolver o projeto detalhado do *Sprinkler*;
- Fazer varredura de parâmetros de tratamento térmico para ajustar a temperatura de transformação de fase de um fio NiTi à temperatura de atuação requerida;
- Fazer planejamento experimental para obter equações que governem a variação das temperaturas de transformação de fase austenítica de um liga com efeito de memória de forma com os parâmetros de tratamento térmico aplicado;
- Definir os parâmetros e realizar a caracterização termomecânica dos fios NiTi a serem utilizados no *Sprinkler*;
- Avaliar o custo-benefício atrelado a sustentabilidade da não necessidade de reposições do *sprinkler* ao ser utilizado, em comparação aos atuais modelos;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Desenvolvimento e propagação de incêndios

Segundo MATA (2018), a palavra fogo vem do latim chamada *focus* e é definida como sendo a reação química ocorrida entre três elementos básicos para sua produção: combustível, comburente e ignição. O Fogo sempre existiu na natureza e tornou-se essencial para a sobrevivência do homem desde a sua existência. O que antes era somente aquecido pelo calor do Sol, após a sua descoberta passou a utilizá-lo para aquecer-se e até mesmo produzir seus alimentos, podendo ser assados ou cozidos. Graças ao fogo foi possível tornar a domesticação de animais e plantas, definindo essa fase como o verdadeiro início de manipulação dos processos bióticos.

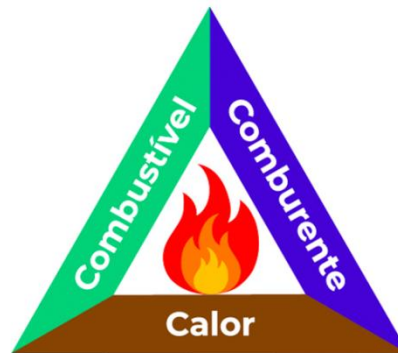
De acordo com MATA (2018), a origem do Fogo é manifestada por meio de algumas fontes naturais, tais como as queimadas, provocadas pela liberação de dióxido de carbono (CO_2) em contato com vapor de água na atmosfera. Há o fogo de origem vulcânica, devido a processos de erupção em áreas de encontro de placas tectônicas, em que são lançadas rochas liquefeitas em alta temperatura, também chamadas de lavas, que em contato com árvores e matas podem produzir o fogo.

Segundo PORTUGAL (2014), a modalidade de incêndio é considerada um fogo que não possui controle, pois sua propagação avança de forma que necessita o combate com outros artifícios e de forma imediata, afim de não adentrar outras áreas. As formas de propagação incêndio estão relacionadas diretamente com a progressão do calor, podendo ser por: condução, convecção, irradiação e projeção.

2.1.1 Triângulo e Tetraedro do Fogo

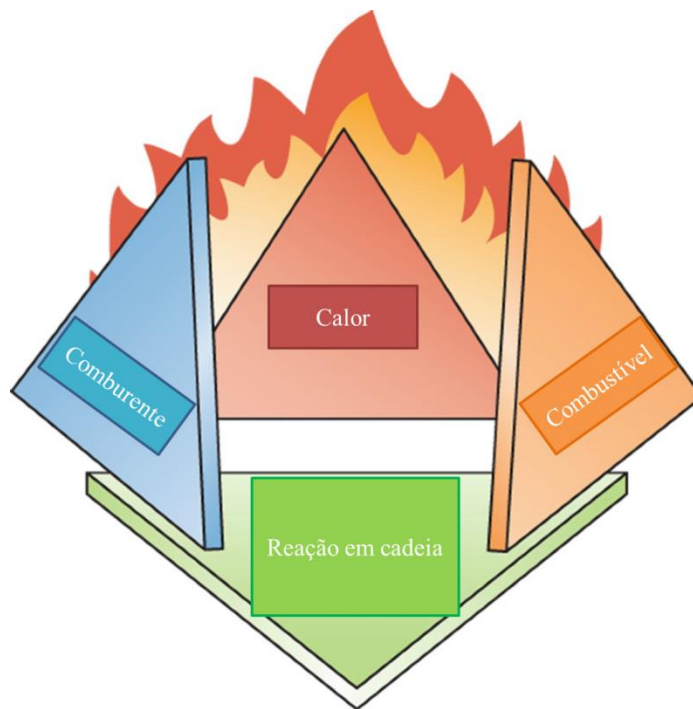
Segundo SIQUEIRA e CORDEIRO (2020), os conceitos mais importantes para todo o estudo do incêndio são o do Triângulo e Tetraedro do Fogo, que são, basicamente, os elementos necessários para que haja a existência deles. Caso algum destes elementos seja retirado, a combustão não existirá ou deixará de existir, como é mostrado na Figura 1 e 2.

Figura 1 – Triângulo do fogo.



Fonte: Pierre-Marie e Nicolas (2020).

Figura 2 – Tetraedro do fogo.



Fonte: Meacham e McnaMee (2022).

Para que o fogo ocorra há a necessidade da existência simultânea desses 3 elementos: calor, combustível e comburente, porém, com a chegada do tetraedro do fogo, um novo componente entrou nesta mistura: a reação em cadeia. De forma resumida, podemos conceituar os componentes do fogo da seguinte maneira:

- Calor: É a quantidade de energia térmica do material inflamável;
- Combustível: Substância que reage com o oxigênio exotermicamente;

- Comburente: Oxigênio do meio em que o material inflamável está inserido;
- Reação em cadeia: Conjunto de radicais livres que ficam dispersos em meio ao fogo, agitando outras partículas e tem o poder para realimentar a combustão.

Caso um desses elementos não ocorra, ou deixe de produzir seu efeito o fogo se extinguirá, consequentemente o incêndio, que é o fogo em descontrole, não se propagará.

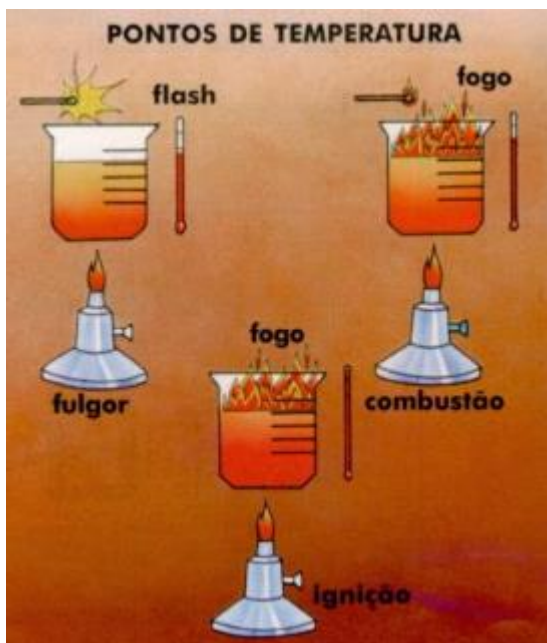
2.1.2 Processos de decomposição e pontos notáveis da combustão

Segundo SIQUEIRA e CORDEIRO (2020), todo material combustível passa por uma decomposição em sua estrutura molecular por meio do processo da pirólise, ou seja, quando se encontra sob ação de altas temperaturas este processo libera gases inflamáveis e estes são responsáveis pela combustão. Os materiais inflamáveis se comportam de três formas em relação a sua temperatura, tais pontos são chamados de ‘pontos notáveis da combustão’, são eles:

- Ponto de Fulgor: é uma temperatura em que o combustível pega fogo ao entrar em contato com um agente externo (Exemplo: fósforo), porém, ao retirar este agente, pelo material não possuir energia suficiente para o ciclo de realimentação, o fogo se extingue;
- Ponto de Combustão: é uma faixa de temperatura em que o material já possui energia o suficiente para se auto alimentar, portanto, ao entrar em contato com um agente externo, ele entra em combustão e se mantém no processo até não haver mais combustível a ser queimado;
- Ponto de Ignição: é a temperatura necessária para fazer o combustível entrar em combustão sem a necessidade de um agente externo.

A imagem da Figura 3 apresentada logo abaixo, ilustra como se caracteriza cada um desses pontos citados.

Figura 3 – Pontos de Combustão.



Fonte: Siqueira e Cordeiro (2020) apud Bombeiros Guardiões da Vida (2016).

2.1.3 Propagação de calor

Segundo PORTUGAL (2014), a propagação de calor ou Transmissão de Calor pode ocorrer em 3 fenômenos, sendo o de condução, o de convecção e o de irradiação. Para saber quais os equipamentos necessários para a extinção do fogo, é importante conhecer como ocorrem esses processos, evitando assim erros no manuseio dos materiais, desperdícios e até mesmo agravamento nos incidentes. Em relação a esses processos temos 4 tipos principais: condução, convecção, irradiação e projeção.

- **Condução:** condução ou difusão térmica é o processo de propagação de calor que ocorre geralmente entre materiais sólidos, sendo ao contato entre moléculas de duas ou mais substâncias com temperaturas diferentes.
- **Convecção:** é quando o processo de transferência de calor ocorre de um fluido ou combustível aquecido se deslocando até outro ponto que contenha material combustível levando energia suficiente para que ocorra combustão, causando novos focos de incêndio ou fogo.
- **Irradiação:** é o processo de transmissão de calor que ocorre por meio de irradiação quando um corpo em chamas atravessa o ar por meio de ondas caloríficas. Enquanto o processo de condução e convecção ocorre por meio de corpos físicos, esse também pode ocorrer no vácuo.

- **Projeção:** é quando, por ação do fogo, parte do material se desprende e se projeta em direção a outro material inflamável, e, por contato direto, faz com que este material entre em combustão.

2.1.4 Formas de controle e extinção do fogo

De acordo com INBEP (2016), os métodos praticados para o controle e extinção do fogo estão baseados em 3 princípios: isolamento ou retirada do material combustível (RMC), o resfriamento e o abafamento. Para ambos os casos, é necessário saber qual o tipo de combustível está sendo reagido no processo da queima para que se possa usar o meio adequado para o controle ou extinção do fogo. Falando mais especificamente de cada um desses métodos, temos as seguintes definições:

- **Isolamento ou Retirada do Material Combustível (RMC):** Este método se dá pela retirada ou isolamento do material combustível ainda não reagido, interrompendo a propagação do fogo da área em combustão, sendo um dos métodos mais fáceis de contenção de fogo, por exemplo, o fechamento de uma válvula de gás ou contenção de um vazamento de combustível líquido.

- **Resfriamento:** Esse processo é o mais utilizado, pois o agente empregado pode ser encontrado com abundância na natureza, a água. Este método consiste em diminuir a temperatura do material combustível em queima, evitando a liberação de mais gases na propagação do fogo. A água possui grande capacidade de absorver calor, sendo que a redução da temperatura e do fogo está relacionada a sua quantidade e forma de como é utilizada, seja em jato ou em volume.

- **Abafamento:** Consiste na diminuição ou impedimento do material comburente (oxigênio) entre em contato com o combustível em queima, sendo que não havendo o oxigênio para a reação, não haverá fogo. Para que ocorra a extinção do fogo nesse método, precisa que a concentração de oxigênio no local reduza até 8%. O Abafamento pode ser empregado por meio de cobertores, espumas, pós-químicos, areias, etc.

2.1.5 Classificações de incêndios

De forma a promover um combate inicial efetivo aos focos de incêndio, equipamentos de proteção coletiva como extintores e hidrantes foram classificados de acordo com suas aplicações específicas, segundo BRENTANO (2007). Este apresenta uma classificação de acordo com o material combustível em cinco letras: A, B, C, D e K.

Na classe A são considerados os materiais que queimam superficialmente e profundamente, deixando resíduos. São característicos os materiais combustíveis como madeira, plástico, borrachas, papéis e tecidos. O agente extintor indicado é a água, pela sua capacidade de resfriamento e penetração.

Para a classe B temos como exemplo os líquidos inflamáveis, tais como: óleos, gases, tintas, gasolina, graxas, álcoois, tinner, etc. Esses combustíveis queimam em sua extensão e geralmente não deixam resíduos. Para a extinção do incêndio desses materiais, é indicado o uso pó-químico e agentes espumantes que misturado com água formam uma camada isolante impedindo a concentração de oxigênio em sua queima.

Em relação a classe C temos materiais e equipamentos energizados, tais como: motores, computadores, transformadores. Porém quando interrompida sua alimentação elétrica, muda a sua classificação e aplica o agente extintor conforme o material envolvido na queima. Esse tipo de incêndio oferece risco ao o sendo indicado o pó químico, líquidos vaporizantes e gás carbônico (CO₂).

No que se refere a classe D temos uma classificação que se diferencia das demais, onde o combustível envolvido no fogo são os metais facilmente fundidos, como o alumínio, magnésio e titânio, que reagem em cadeia e dificulta sua extinção por meio dos métodos convencionais. Seu combate é realizado por meio de abafamento, porém exige técnicas, equipamentos e agentes extintores especiais isolando o metal combustível.

Por último temos a classe K caracterizada por incêndios derivados de queima de óleos e gorduras em cozinhas, onde seu agente extintor recomendado são os espumantes que em mistura com água formam uma camada isolante impedindo a concentração de oxigênio em sua queima. A Figura 4 apresenta um quadro resumo das classes de incêndio para cada tipo de extintor.

Figura 4 – Classes de incêndio relacionadas a cada extintor.



Fonte: Redesul (2021).

2.1.6 Medidas aplicáveis à segurança de incêndio

Existem diversas medidas capazes de controlar ou mesmo diminuir as chances de uma ocorrência de incêndio. Entre essas estão ações de cunho coletivo e individual. Segundo Ono (2004), o acesso à edificação é um ponto crítico nesse processo e deve ser entendido como o trajeto do posto de bombeiros até o local da ocorrência. Por isso os acessos aos interiores das edificações devem proporcionar facilidade aos bombeiros e seus equipamentos em situações de emergência, visando eficácia no emprego de salvamento as vítimas e no combate ao incêndio. Também vale ressaltar a importância da circulação das viaturas dentro da edificação, e não somente atendendo a entrada do local em si, para isso, a responsabilidade de um projeto elaborado com conhecimento nas normas é primordial para que se possa viabilizar e atender os requisitos da NPT (Norma de procedimento técnico) que normatiza esse quesito.

Em relação a segurança estrutural contra incêndio atende aos critérios mínimos para que evite a propagação do incêndio as edificações adjacentes, levando em conta os conceitos de transmissão de calor, seja por radiação, convecção ou condução. Esses critérios garantem o isolamento dos locais não afetados permitindo o controle da situação e a facilidade de acesso dos agentes no trabalho de contenção ou extinção do fogo.

Outro ponto a ser considerado são as saídas de emergência. Essas são determinadas de acordo como será realizado o tempo para evacuação de um determinado local em situação de incêndio ou pânico dos ocupantes. Segundo Ono (2004), as características básicas de uma saída de emergência devem estar relacionadas ao movimento de evacuação de forma que os ocupantes se locomovam continuamente até um local seguro fora da edificação, considerando as características dos ocupantes em número, idade, condições físicas e psíquicas, sexo e etc.

Considera-se também saídas de emergência as rotas de fuga, que devem possuir mensagens clara e de fácil compreensão, evitando direcionamento a corredores tortuosos ou escadas de difícil acesso e escondidas. Com relação as escadas, estas devem ser bem distribuídas e dimensionadas na edificação para que o fluxo de pessoas escoe com facilidade evitando acidentes.

Segundo PORTUGAL (2014), a brigada de emergência é uma equipe formada por pessoas treinadas e capacitadas para atuar em situações de prevenção e combate a incêndio e primeiros socorros, devendo ser constituídas de acordo com a classificação da edificação, tais como: altura, área construída, número de habitante ou ocupantes, número de pavimentos e tipo da edificação.

Outra medida utilizada é o sistema de sinalização de saídas de emergência que tem a finalidade de fornecer indicação visual do encaminhamento das rotas de fuga, que pode ser luminoso ou fosforescente, e deve ser instalado em todos os pavimentos. A iluminação de emergência deve facilitar o deslocamento de pessoas pelos locais de acesso em saídas de emergência, corredores, escadarias, vãos livres, espaços confinados e etc., nos casos em que houver a necessidade da interrupção do fornecimento energia elétrica ou quando por algum motivo as empresas concessionárias do fornecimento de energia apresentarem alguma falha ou problema.

De modo a que ocorra a rápida detecção e o devido controle de incêndio, temos segundo Ono (2007) que existem sistemas de detecção e alarme de incêndio tais como manuais, botoeiras e acionadores automáticos, detectores de fumaça, temperatura, raios infravermelhos e etc, ligados a alarmes automáticos. Os sistemas automáticos são mais eficientes, pelo fato de permitir a identificação e localização do incêndio assim que acionado ou detectado.

Com base na NPT 020 - CSCIP-CB/PMPR (2014), temos ainda a questão da sinalização de emergência que tem como finalidade reduzir o risco de ocorrência de incêndio, alertando para os riscos existentes e garantindo que sejam adotadas ações adequadas à situação de risco, orientações as ações de combate, facilidade na localização dos equipamentos e das rotas de saída para abandono seguro da edificação em caso de incêndio. Para isso devemos utilizar a

sinalização de emergência de acordo com a classificação das áreas de riscos, conveniente ao interior das edificações. A sinalização é caracterizada pelas formas geométricas e dimensões, podendo ser do tipo básica ou complementar. A básica está dividida entre quatro categorias: proibição, alerta, orientação e salvamento e equipamentos. A sinalização complementar tem como finalidade indicar rotas de saída, obstáculos e riscos de utilização das rotas de saída, e mensagens específicas que complementam a sinalização básica.

Ainda temos os dispositivos hidrantes e mangotinhos. De acordo com o CSCIP – NPT 03 (2014), hidrante é o ponto de tomada de água onde há uma (simples) ou duas (duplo) saídas contendo válvulas angulares com seus respectivos adaptadores, tampões, mangueiras de incêndio e demais acessórios. Os hidrantes podem ser classificados em 3 tipos:

- Hidrantes de colunas ou urbanos: O aparelho é ligado à rede pública de distribuição de água permitindo a adaptação de bombas e/ou mangueiras padronizadas, e o ponto de tomada de água é provido de dispositivo de manobra (registro) e união de engate rápido. Como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Hidrante de coluna.



Fonte: Gifel (2018).

- Hidrantes de parede: É caracterizado pelo ponto de tomada de água instalado na rede particular, embutido em parede, podendo estar no interior de um abrigo de mangueira. De acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Hidrante de parede.



Fonte: Pastorino (2018).

- Hidrantes industriais: Componentes instalados em fábricas, usinas, portos e etc., e geralmente é específico e calculado para o combate ao incêndio, considerando vazão e pressão, tipo de mangueira, edificação. Ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Hidrante industrial.



Fonte: Hidromon (2022).

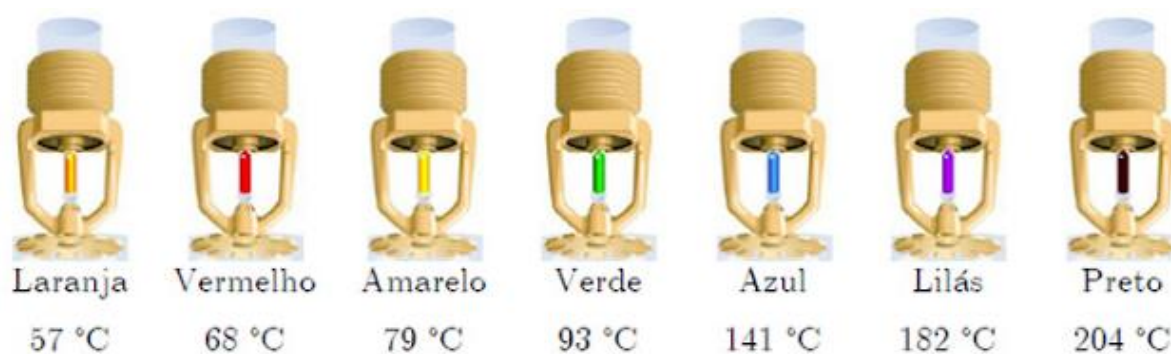
2.1.7 Chuveiros Automáticos (*Sprinklers*)

Nessa etapa vale ressaltar a relevância de aplicação dos chuveiros automáticos ou do termo em inglês, *Sprinkler*, para o devido combate a incêndios. De acordo com a NBR 10897 (2008), para fins de proteção contra incêndio, consiste em um sistema integrado de tubulações aéreas e subterrâneas alimentadas por uma ou mais fontes de abastecimento automático de água. A parte do sistema de chuveiros automáticos acima do piso consiste em uma rede de tubulações dimensionada por tabelas ou por cálculo hidráulico, instalada em edifícios,

estruturas ou áreas, normalmente junto ao teto, à qual são conectados chuveiros automáticos segundo um padrão regular. A válvula que controla cada coluna de alimentação do sistema deve ser instalada na própria coluna ou a tubulação que a abastece. Cada coluna de alimentação de um sistema de chuveiros automáticos deve contar com um dispositivo de acionamento de alarme. O sistema é normalmente ativado pelo calor do fogo e descarrega água sobre a área de incêndio.

Em relação ao seu princípio de funcionamento, segundo SKOP (2018), os *sprinklers* são ativados a partir do seu elemento termossensível (bulbo ou liga fusível) quando o ambiente atinge uma determinada temperatura; esta é a temperatura de acionamento ou temperatura nominal do *sprinkler*. Existem faixas de temperaturas definidas em norma, porém foram adotados valores de referência comercial. Os valores mais convencionais no mercado brasileiro são 68°C, 79°C, 93°C e 141°C. De todos os seus componentes, o bulbo é o que merece mais atenção. Ele é uma cápsula de vidro que possui um líquido expansível em seu interior. Ou seja, quando a temperatura do ambiente se eleva, o líquido se expande liberando a água para contenção do incêndio. A Figura 8 ilustra a associação de cores dos bulbos termossensíveis para cada temperatura especificada. E a Figura 9 apresenta uma perspectiva do funcionamento do *sprinkler* quando em atuação.

Figura 8 – Cores de bulbos de vidro.



Fonte: Bombeiros corpo (2016).

Figura 9 – Comparação entre o combate a incêndio de ambientes com e sem *sprinklers*.



Fonte: Skop (2018).

De forma a tornar a classificação mais intuitiva e dinâmica a tabela 1, com base na NBR 10897 (2008), apresenta todas as subdivisões dos chuveiros automáticos de acordo com as várias especialidades nas quais é encontrado. A Tabela 1 apresenta todas essas informações.

Tabela 1 – Classificações de *sprinklers*.

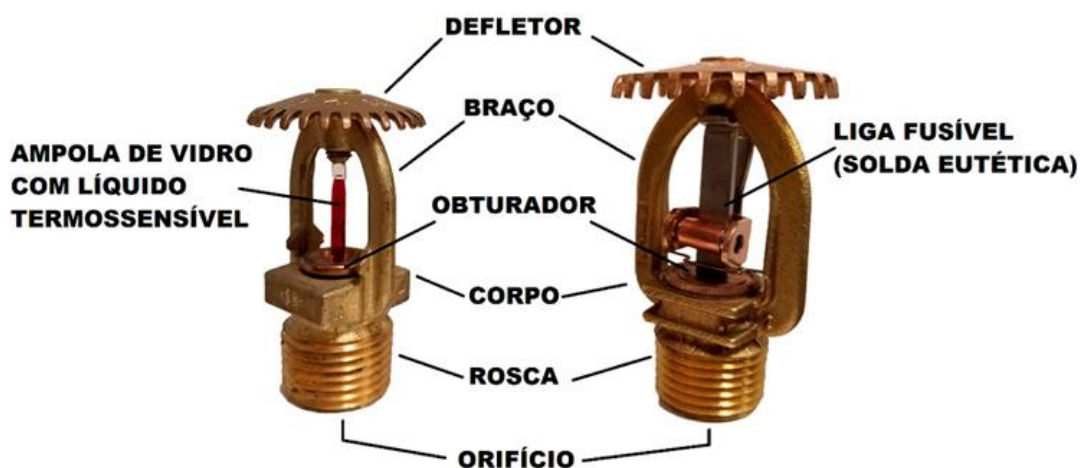
Por elementos termossensíveis	- Tipo ampola de vidro; - Tipo liga fusível;
Por distribuição de água	- Chuveiros de cobertura padrão; - Chuveiro de cobertura estendida; - Chuveiro tipo Spray;
Por velocidade de operação	- <i>Sprinkler</i> de resposta rápida; - <i>Sprinkler</i> de resposta padrão;
Por orientação da instalação	- Chuveiro em pé; - Chuveiro embutido; - Chuveiro flush; - Chuveiro lateral; - Chuveiro oculto; - Chuveiro pendente;

Pelas condições especiais de uso	- Chuveiro decorativo; - Chuveiro resistente à corrosão; - Chuveiro seco;
De acordo com o desempenho e projeto	- <i>Sprinkler</i> de controle para aplicações específicas (CCA); - <i>Sprinkler</i> de resposta e supressão rápidas (ESFR);

Fonte: NBR 10897 (2008).

No que se referem aos componentes constituintes dos chuveiros automáticos temos elementos secundários, pertencentes a própria estrutura do *sprinkler*, bem como os elementos principais de atuação como o bulbo termossensível e o defletor. A Figura 10 ilustra detalhadamente todo o sistema.

Figura 10 – Componentes de um chuveiro automático.



Fonte: EARLY engenharia (2022).

De forma a mostrar uma perspectiva geral de todos os componentes de combate a incêndio a Figura 11 apresenta detalhadamente esses elementos, como sinalização de emergência, saídas de emergência, mangotinhos, extintores, dentre outros.

Figura 11 – Visão geral de um sistema de combate a incêndio.



Fonte: Santos (2022).

Após analisado todo um embasamento a respeito de formas de combate à incêndio, os próximos passos apresentarão materiais que podem ser utilizados como atuadores, de forma a mostrar possibilidades de substituição aos mecanismos existentes por bulbos termossensíveis.

2.2 Atuadores não convencionais

Com base em SILVEIRA (2018), tem-se que a definição de atuadores mecânicos como dispositivos que convertem uma fonte de energia em um movimento de trabalho. A fonte de alimentação pode ser ativada manualmente ou ligada e desligada por um sistema automatizado. Os atuadores assim, se caracterizam como importantes componentes, principalmente no que tange aos elementos finais do sistema, realizando aplicações a um certo destino fim. Existem alguns materiais específicos que conseguem apresentar características que os classifica como atuadores. Dentre eles podemos citar: as cerâmicas piezoelétricas, os fluidos reológicos, magneto-reológicos e as ligas com efeito memória de forma.

2.2.1 Cerâmicas piezoelétricas

Com base em CERAMTEC (2022), a piezocerâmica é usada para converter os parâmetros mecânicos, como a pressão e aceleração, em parâmetros elétricos ou, inversamente, para converter sinais elétricos em movimento ou vibração mecânica.

Os materiais piezocerâmicos são categorizados como cerâmica funcional. Nos sensores, eles possibilitam converter forças, pressões e acelerações em sinais elétricos e nos atuadores e transdutores sônicos e ultrassônicos, eles convertem as voltagens elétricas em vibrações ou deformações. Por um lado, os materiais piezocerâmicos são classificados de acordo com sua composição química, por outro lado, são classificados pelas condições de aplicação específica. Como é mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Cerâmicas piezoelétricas.



Fonte: CERAMTEC (2022).

2.2.2 Fluidos Reológicos

Segundo BRASEQ (2022), a reologia é a ciência que estuda como o fluido se comportará quando submetido a uma deformação ou força de cisalhamento. Ela estuda como será o fluxo e a quantificação da resistência ao escoamento, essa propriedade física denomina-se viscosidade. Ao se estudar a reologia dos fluidos, podemos classificá-los como Newtonianos e não-Newtonianos; os fluidos Newtonianos apresentam em uma dada temperatura valor de viscosidade independente da variação da velocidade em função da taxa de cisalhamento enquanto aqueles fluidos classificados como não-newtonianos apresentam comportamento divergente à essa independência, isto é, os valores de viscosidade podem aumentar ou diminuir em função do aumento da velocidade ou taxa de cisalhamento.

Além da classificação do produto com relação à sua dependência ou não da taxa de cisalhamento, estudar a reologia dos fluidos compreende avaliar também parâmetros como Tensão de Escoamento, Tixotropia, Deformação e Recuperação além de quantificação de parâmetros visco-elásticos. Em aplicações do dia a dia ou mesmo no controle de qualidade e desenvolvimento de produtos é de suma importância conhecer a reologia dos fluidos para os produtos que estão sendo analisados.

2.2.3 Fluidos magneto-reológicos

Segundo LIMA (2011), os fluidos magneto-reológicos (MRs) são fluidos que apresentam uma alteração reversível em suas propriedades reológicas: viscosidade, elasticidade e plasticidade, quando expostos a um campo magnético. Quando não há a exposição a um campo magnético, o fluido se comporta como um fluido newtoniano comum. Na presença de um campo magnético, o fluido MR apresenta um comportamento visco-plástico com a tensão de escoamento em função da intensidade do campo magnético.

Os fluidos MR são constituídos de micropartículas magneticamente polarizadas (óxido de ferro), suspensas em um fluido excipiente, como por exemplo: óleo mineral, óleo sintético ou silicone. Quando expostas a um campo magnético, as partículas do fluido apresentam um momento de dipolo paralelo à direção das linhas de fluxo do campo magnético. Desta forma, as partículas, anteriormente dispersas, se alinham ao longo das linhas de fluxo do campo magnético, formando uma estrutura em forma de correntes.

Em relação a aplicação, temos como mais comuns para os fluidos magneto-reológicos os amortecedores, onde a capacidade destes alteraram de maneira reversível a sua viscosidade fazendo com que os amortecedores tenham uma grande potencialidade em aplicações de controle e isolamento de vibrações. Com isso podemos aplicar esses fluidos em: suspensões automotivas, amortecimento em assentos de veículos pesados, sistemas de amortecimento sísmicos, próteses inteligentes, e sistemas de realimentação tátil. A Figura 13 mostra uma dessas aplicações.

Figura 13 – Ponte Pênsil, China. Um par de amortecedores MR foi colocado em cada um dos cabos de aço de sustentação.



Fonte: (Ko et. al., 2003).

Após visto alguns materiais que podem ser utilizados como atuadores não convencionais, destaca-se agora a funcionalidade das ‘ligas com efeito memória de forma’, essas apresentam

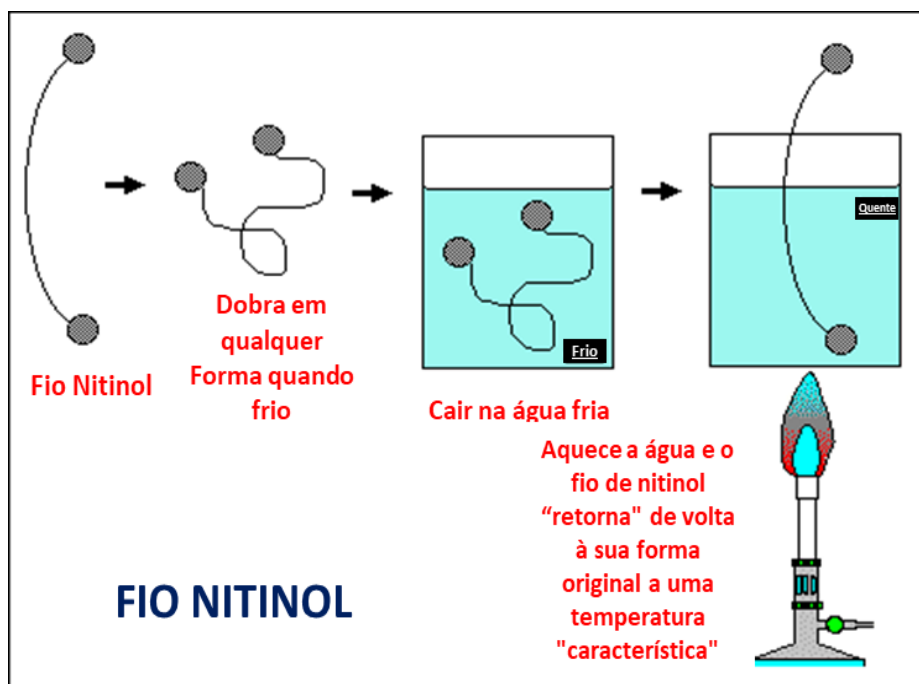
aspectos constitutivos de sua estrutura que as permitem realizar uma transição de fase com características distintas, possibilitando um nível de geração de força de acordo com a fase que se encontra.

2.2.4 Ligas com efeito memória de forma (LMF)

Segundo OTSUKA E WAYMAN (1998) *apud*, H.B. PENG *et. al* (2022), as LMF são ligas metálicas que sofrem transformações de fase no estado sólido, induzidas por apropriado ciclo de temperatura ou de tensões mecânicas. Essas ligas têm a capacidade de recuperar a sua geometria original após sofrer uma deformação “pseudoplástica” com subsequente imposição de um campo de temperatura que causa transformações de fase induzidas no material. Basicamente, as ligas memória de forma apresentam duas fases cristalográficas distintas denominadas de austenita e martensita. Geralmente estes materiais podem ser facilmente deformados plasticamente a uma temperatura relativamente baixa (fase martensita) e ao serem expostos a uma temperatura mais elevada (fase austenítica), retomam a forma inicial. Esta transformação reversível austenita – martensita – austenita está relacionada a 4 temperaturas características associadas ao início e final da transformação direta austenita – martensita durante o resfriamento (M_i e M_f) e ao início e final da transformação reversa martensita – austenita durante aquecimento (A_i e A_f). Como $A_i \neq M_f$ e $A_f \neq M_i$ essa transformação é acompanhada de uma histerese em temperatura característica desses materiais.

As LMF apresentam um comportamento completamente diferente dos materiais clássicos. Esse fenômeno está associado a uma transformação martensítica especial, que tem a característica de ser termoelástica e reversível, diferentemente da transformação martensítica que ocorre nos aços. O comportamento termomecânico associado a essa transformação termoelástica envolve o efeito de memória de forma simples ("*one-way shape memory effect*"), o efeito de memória de forma duplo ("*two-way shape memory effect*") e o efeito superelástico, simplesmente conhecido por superelasticidade. A Figura 14 logo abaixo mostra como se processa essa transformação termoelástica para ligas com efeito memória de forma.

Figura 14 – Transformação LMF em liga NiTi.



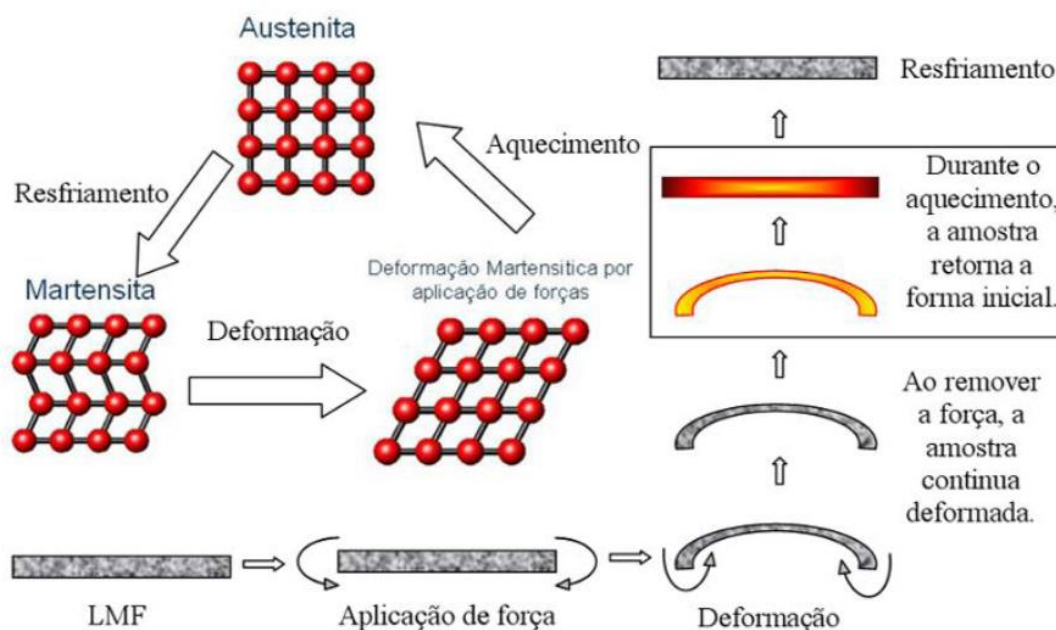
Fonte: Tecnologia Monino (2018).

2.3 Características gerais das ligas com efeito memória de forma (LMF)

Com o objetivo de especificar o objetivo principal do estudo, nessa etapa buscou-se apresentar características específicas dessas ligas tão peculiares, bem como os seus mais variados efeitos e formas de caracterização disponíveis. Por fim é mostrado de forma mais abrangente a liga escolhida para a aplicação do projeto.

2.3.1 Efeito memória de forma unidirecional (simples) (“One-Way Shape Memory Effect”)

Segundo OTSUKA E WAYMAN (1998) *apud*, H.B. PENG *et. al* (2022), O efeito memória de forma simples (EMFS) é a capacidade que as LMF apresentam de recuperarem uma deformação “pseudoplástica” através do aquecimento acima de uma temperatura crítica. Este fenômeno está associado à transformação da fase martensítica termoelástica para a fase austenítica. A deformação é induzida na fase martensítica, abaixo da temperatura crítica M_f em que a LMF é extremamente dúctil, e recuperada com um aquecimento acima da temperatura crítica A_i em que o material inicia a mudança para a fase austenita. Esse efeito é também conhecido como efeito de memória unidirecional e é caracterizado por não apresentar, durante o resfriamento da LMF, nenhuma alteração de forma, ainda que a estrutura sofra a transformação martensítica reversa, de austenita para martensita. A Figura 15 ilustra como ocorre esse efeito de memória de forma simples.

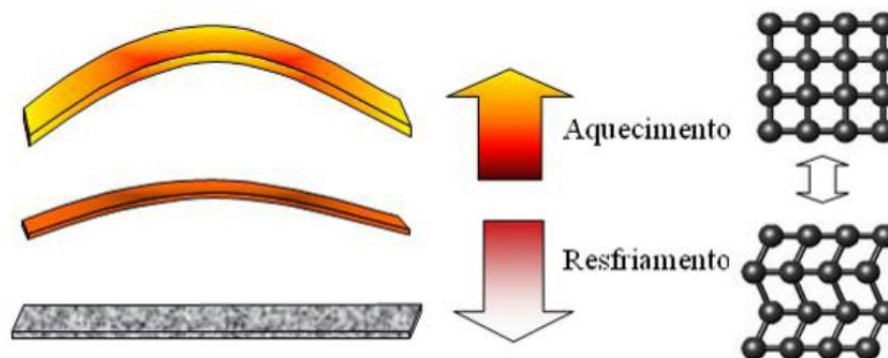
Figura 15 – Esquemática do EMFS.

Fonte: Reis (2006).

2.3.2 Efeito memória de forma bidirecional (“Two-Way Shape Memory Effect”)

De acordo com OTSUKA E WAYMAN (1998) *apud*, H.B. PENG *et. al* (2022), o efeito memória de forma bidirecional pode ser definido como o fenômeno constituído por uma mudança espontânea na forma da LMF nos dois sentidos da transformação, de austenita para martensita e vice-versa, sem que seja necessária a aplicação de tensões externas, ou seja, depende apenas da temperatura. O fenômeno de mudança de forma espontânea entre as 2 formas pode ser repetido inúmeras vezes. Esse fenômeno é conseguido através de um método conhecido como treinamento ou “educação” da LMF, que é baseado em processos de ciclos termomecânicos e tem a característica fundamental de introduzir defeitos irreversíveis na fase austenítica, os quais permanecem no aquecimento e controlam o crescimento da variante de martensita quando o material é resfriado novamente. A Figura 16 ilustra como ocorre esse efeito.

Figura 16 – Esquemática do efeito memória de forma duplo ou bidirecional.



Fonte: Reis (2006).

2.3.3 Superelasticidade

Segundo ZHANG e MCCORMICK (2000b), a superelasticidade é também conhecida como pseudoelasticidade e essa denominação deve-se ao fato das LMF poderem sofrer uma deformação muito extensa (chegando a 8% de deformação para algumas LMF) que pode ser total ou parcialmente recuperável, também em grande extensão.

O comportamento superelástico é associado com a formação e reversão da martensita induzida por tensão a partir da austenita quando a LMF é carregada e descarregada mecanicamente a uma temperatura constante acima da temperatura A_f . A tensão aplicada provê a força motriz para a transformação termoelástica da austenita em martensita acontecer.

2.3.4 Efeito de amortecimento

De acordo com LU *et. al*, (2003), o amortecimento mecânico dos materiais é o resultado de uma transformação irreversível de energia mecânica em energia térmica que é dissipada pelo sistema por atrito interno.

O atrito interno depende da temperatura, da frequência, da amplitude de deformação e, evidentemente, do material e do seu estado estrutural. No caso das LMF, considerando-se o estado do material e a deformação, observam-se três situações para as quais o atrito interno assume valores muito diferentes:

- No estado austenítico, o atrito interno devido ao movimento reversível das discordâncias e defeitos pontuais é baixo, com isso, simultaneamente com a diminuição da amplitude das oscilações associada ao atrito interno, observa-se uma variação do módulo de rigidez resultante do mesmo fenômeno;

- No estado martensítico, o atrito interno está associado ao movimento reversível das interfaces entre variantes de martensita, o que resulta em um alto atrito interno e consequentemente maior amortecimento;
- Durante a transformação de fase, o atrito interno assume um valor mais elevado, pois está associado ao movimento de interfaces austenita/martensita.

De acordo com VILAR (2013). Essa capacidade de amortecimento que as LMF possuem é atribuída à mobilidade das interfaces martensita/martensita e martensita/austenita, além dos contornos de maclas apresentados por essas ligas. Esse comportamento das LMF diante a excitação mecânica é bastante peculiar visto que apresenta um alto grau de amortecimento, podendo levar a um melhor comportamento de atenuação de vibração e aumentar consideravelmente o tempo de vida útil dos produtos fabricados a partir desses materiais ativos.

O controle de vibrações é um campo de estudo bastante relevante dentro da engenharia mecânica cujo principal objetivo reside na atenuação das vibrações de um sistema primário. Nesse campo, as LMF têm sido utilizadas para o controle passivo de estruturas devido à sua alta capacidade de amortecimento, consequência de seu comportamento histerético relacionado com as transformações de fase sofridas pelo material.

2.3.5 Ligas Níquel-Titânio (NiTi)

Com base em VILLARINHO (2010), as ligas de NiTi tem composição química binária, inter-metálica e equiatômica (49% Ti – 51% Ni), com densidade $6,9 \text{ g/cm}^3$, ponto de fusão $1310 \text{ }^\circ\text{C}$. As propriedades dessas ligas podem ser controladas por meio de processamentos termodinâmicos do material, que então podem exibir as propriedades desejadas. NiTi é uma liga não-magnética. MRI (Imagem por ressonância magnética) é, portanto, possível.

Nitinol é levemente mais radiopaco, que o aço inoxidável. Radiopacidade, parte opaca da chapa do RX e as imagens escurecidas são radiolúcidas. A densidade (massa/volume) e o número atômico contribuem com a radiopacidade do material. Materiais radiopacos impedem a passagem da radiação eletromagnética, energia radiante e RX. Se comparadas ao cobre as ligas NiTi, podem sofrer maior deformação 8% e as ligas de cobre 4 a 5 %, tendendo a ser mais estáveis termodinamicamente, tem excelente resistência a corrosão em comparação as ligas de cobre e biocompatibilidade.

Ainda segundo VILLARINHO (2010), a indústria de equipamentos médicos tem desenvolvido diversos produtos, usando ligas de NiTi devido a sua excelente biocompatibilidade e alta pseudoelasticidade.

As ligas Nitinol possuem características bastante interessantes, podendo por exemplo serem utilizadas como atuadores termomecânicos. A Tabela 2 mostra um comparativo entre essas ligas em relação a outros materiais ativos.

Tabela 2 – Comparação comercial e potencial da atuação de alguns materiais ativos.

	PZT 5H	PVDF	PMN	Terfenol D	NITI	Power Act
Mecanismo de atuação	Cerâmicas Piezoelétricas	Filme Pieso	Eletro-estritivo	Magneto-estritivo	Ligas com memória de forma	Compósitos Piezoelétricos
Deformação máxima	0,13 %	0,07 %	0,1 %	0,2 %	2%-8%	-
Módulo de elasticidade, GPa	60,6	2	64,5	29,7	28 (m), 90 (a)	-
Densidade, Kg/m³	7500	1780	7800	9250	7100	-
Energia de atuação	6,83	0,275	4,13	6,42	252-4032	-
Histerese	10 %	>10 %	<1 %	2 %	alta	-
Faixa de temperatura	-20 a 200 °C	-70 a 70°C	0 a 40 °C	-20 a 180 °C	-100 a 200 °C	0 a 200 °C
Faixa de frequência	100 KHz	100 KHz	100 KHz	< 10 KHz	< 5 KHz	> 10 KHz

Fonte: Menard, (2007).

2.4 Influência do tratamento térmico nas temperaturas de transição de fase de ligas LMF

Com base em WIGGERS (2011), as propriedades finais do NiTi são dependentes das temperaturas nas quais ocorrerão as transformações de fase. A temperatura final de transformação austenítica (A_f), representa a completa transformação da estrutura para fase austenítica no aquecimento. As temperaturas de transformação são determinadas principalmente pela quantidade de níquel e titânio contida na liga, sendo extremamente sensíveis a pequenas variações de composição.

Ainda com base em WIGGERS (2011), a presença de impurezas no material poderá afetar as temperaturas de transformação do material também como suas propriedades mecânicas. E de acordo com RUSSEL (2001), a maioria dos elementos são depressores das temperaturas de transformação. Estes podem reagir com o titânio formando precipitados resultando em um enriquecimento na quantidade de níquel na matriz, acarretando na diminuição das temperaturas de transformação.

2.5 Aplicações das ligas LMF como atuadores

De forma a ilustrar a diversidade de aplicações existentes das ligas memória de forma, como atuadores. Que o presente tópico visa mostrar detalhadamente algumas dessas aplicações, visando mostrar a aplicabilidade e versatilidade desse material inteligente.

2.5.1 Impressão 4D para o desenvolvimento de atuadores com o a utilização de LMF

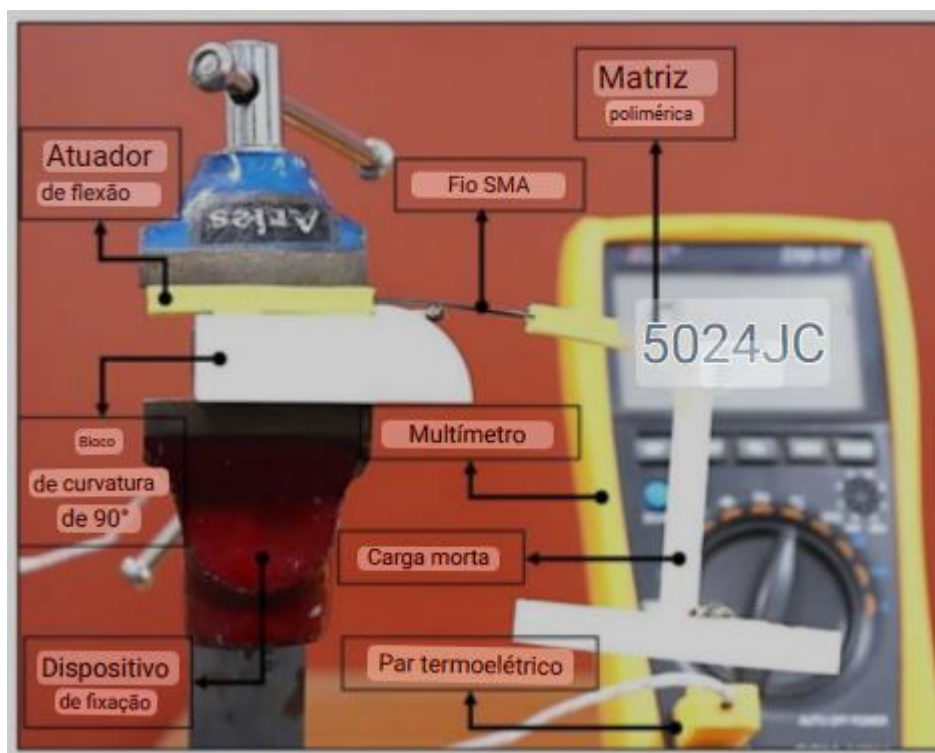
De acordo com RAKSHITH *et. al* (2022), a tecnologia de impressão 4D está ganhando imensa atenção no desenvolvimento de atuadores, robôs flexíveis e sensores, que utilizam Materiais Inteligentes para seu funcionamento. Uma das aplicações de vanguarda da técnica de impressão 4D é a construção de atuadores que exibem alta força de atuação, alta estabilidade e repetitividade usando uma classe de materiais inteligentes mutáveis de forma denominada Ligas com Memória de Forma (LMF). As ligas são constituídas de Ni-Ti, Ni-Ti-Cu e Ni-Ti-Fe. A avaliação do desempenho dos atuadores construídos é realizada através da determinação da resistência de descolamento da interface matriz-liga, e das capacidades funcionais, tais como, força de atuação, recuperação de deformação residual, percentual de redução de deslocamento.

Através dessa avaliação registrou-se que a resistência do atuador Ni-Ti-Fe foi consideravelmente maior em comparação com os outros equivalentes devido à combinação de maior coeficiente de valores de atrito na interface matriz-LMF e maior resistência com a

inclusão de Fe. As deformações mais baixas são registradas para atuadores Ni-Ti-Fe em comparação com outros equivalentes à base de Ni-Ti, como resultado da maior resistência à tração da liga Ni-Ti-Fe.

Devido à natureza pseudoelástica parcial do atuador de Ni-Ti-Cu, a porcentagem de recuperação de deformação residual é inferior à do atuador de Ni-Ti. E a porcentagem de redução de deslocamento varia conforme $\text{Ni-Ti-Fe} < \text{Ni-Ti-Cu} < \text{Ni-Ti}$ para atuadores baseados em Ni-Ti. Os percentuais mais baixos de redução de deslocamento são atribuídos a menores dissipações de energia com histerese reduzida. A Figura 17 mostra como foi realizado o ensaio de flexão da amostra.

Figura 17 – Configurações do experimento de flexão da LMF.



Fonte: Rakshith *et. al* (2022).

2.5.2 Fabricação aditiva de estruturas Compostas Inteligentes Baseadas em Fios Flexinol

Segundo Dudek *et. al* (2022), a impressão 3D de uma estrutura composta com materiais memória de forma requer um trabalho especial. O fenômeno da memória de forma em fibras com o nome comercial de flexinol tem em sua composição que a deformação de sua estrutura relacionada com a posição da fibra LMF em relação ao eixo neutro de flexão. A Figura 18 apresenta um atuador fabricado em impressora 3D com utilização de fios Flexinol.

Figura 18 – Atuador fabricado em impressora 3D com utilização de fios Flexinol.

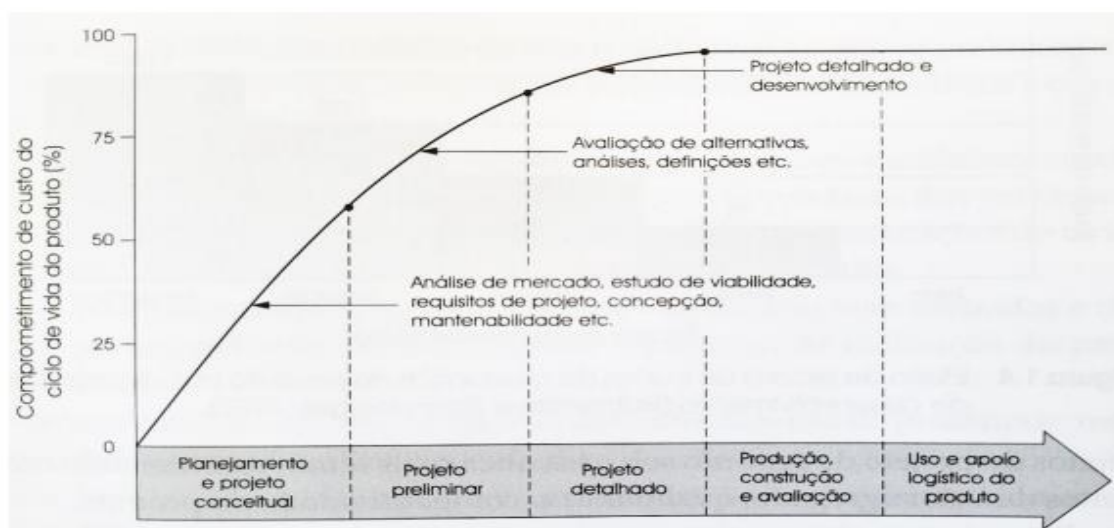


Fonte: Dudek *et. al* (2022).

2.6 Gerenciamento e metodologia de projeto

De forma a auxiliar no desenvolvimento do projeto, que o presente tópico busca elencar pontos importantes para as etapas de um projeto consolidado. Um projeto de um determinado produto não é apenas algo que pode ser levado pelo lado singular, pelo contrário, várias etapas são seguidas para que o projeto possa sair da simples ideia/necessidade para a reprodução do primeiro protótipo. Na maioria dos casos o próprio valor atribuído ao protótipo chega a ser 2 ou até 10x mais do que o valor em produção do produto, pois como dito vários estágios devem ser seguidos para que o projeto não venha apresentar falhas na sua conclusão final e, principalmente, atenda a necessidade pelo qual foi fabricado. Entre essas etapas estão: Planejamento e projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, produção, construção e avaliação, uso e apoio logístico do produto. A Figura 19 mostra a relação de cada uma dessas etapas com o custo do ciclo de vida de cada uma.

Figura 19 – Efeitos das diferentes fases do ciclo de vida sobre o custo do produto.



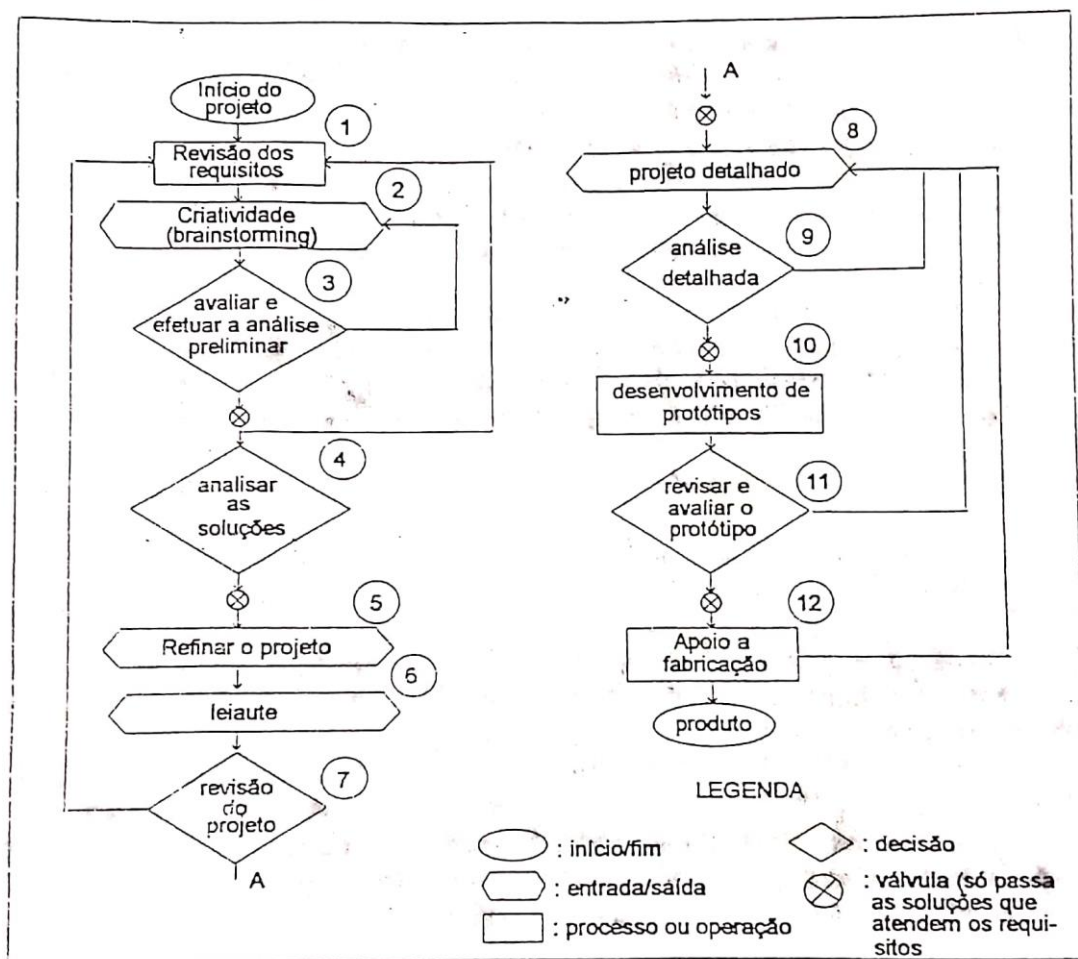
Fonte: Blanchard e Fabrycky, apud Back e Forcellini (2002).

2.6.1 Projeto de produtos segundo Coryell

De acordo com CORYELL (1967), apud BACK e FORCELLINI (2002), a sistemática de um projeto é composta de 12 etapas. O ponto de partida é a ‘revisão’ completa de todos os ‘requisitos’ – etapa 1, com essa fase o problema pode ser adequadamente definido, e assim mais facilmente resolvido. A segunda etapa remete a ‘criatividade’ do projetista, ou seja, a busca de soluções capazes de solucionar o problema pelo projetista, como exemplo temos o *brainstorming* ou tempestade de ideias no português. Esse método se refere a reunião em que os projetistas apresentam várias soluções possíveis para o problema proposto, e assim toma-se algo de cada coisa para que se chegue a um resultado final satisfatório. O próximo passo refere-se a ‘avaliações das análises preliminares’. Nessa dois critérios são considerados importantes: o custo em relação aos concorrentes e o avanço tecnológico, com esse processo de revisão é possível a eliminação de funções desnecessárias e o refinamento de aspectos de cada abordagem. A quarta etapa, ‘análise das soluções’, se configura basicamente como um apanhado das etapas anteriores. Encarregando-se de uma avaliação das funções escolhidas em função do custo requerido dos processos. A quinta etapa, ‘refinamento do projeto’, visa realizar atividades de caráter mais específico, sendo assim pode reduzir o número das partes, padronizar outras, estabelecer fixações e efetuar esquemas para registros temporários das soluções. A seguir realiza-se o ‘leiaute do projeto’, onde se configura como um primeiro resultado da fase de concepção de projeto. Nele estão contidas a ordenação e escolha das ideias, análises preliminares, investigações e refinamentos utilizados.

A etapa 7 refere-se a ‘revisão de projeto’, que é um requisito primordial para sua posterior aprovação. Com todas as etapas anteriores já conquistadas pode-se agora elaborar todos os desenhos necessários, com suas respectivas tolerâncias, e a verificação final dos materiais contidos na fábrica, na fase de ‘projeto detalhado’. A etapa 9 diz respeito a ‘análise detalhada’, onde três requisitos básicos devem ser considerados: definição e documentação clara das técnicas de análise, profundidade de análise, documentação dos critérios de decisão. Terminada essa etapa segue-se para o ‘desenvolvimento de modelos e protótipos’, onde, os testes finais serão realizados através de modelos do tipo: modelo piloto, “*mockup*”, protótipo, e item de teste. Com os resultados dessa fase pode-se efetuar a ‘revisão e avaliação do protótipo’, onde se verifica o produto com relação aos seus requisitos iniciais. Por fim, a última etapa trata do ‘suporte a fabricação’, configurando-se como o acompanhamento do produto, pelo projetista, durante o processo de fabricação para decidir sobre quaisquer alterações que se façam necessárias. A Figura 20 mostra um fluxograma-resumo de todas as etapas de projetos de produto segundo Coryell.

Figura 20 – Etapas do projeto segundo Coryell.



Fonte: Coryell, apud Back e Forcellini (2002).

2.6.2 Matriz de escolha ou decisão

Segundo SPADA (2016), a matriz de escolha ou decisão é uma ferramenta importante que permite uma análise rápida por meio de critérios que favorecem uma visão ampla e coerente de várias alternativas. Apesar de apresentar caráter subjetivo, ela pode servir como um certo guia para encontrar tendências que possam se enquadrar à realidade desejada no projeto futuro. A matriz também consegue apontar os pontos fortes e fracos de cada ideia, tornando mais simples dessa forma a escolha.

A matriz de escolha possui os seguintes passos para sua correta utilização:

- Na coluna da esquerda descreve-se as ideias propostas em um total de 5;
- Nas colunas subsequentes coloca-se os critérios de avaliação escolhidos, por exemplo impacto, esforço, lucratividade e visão. Os valores tomados como base podem ser em

uma escala de 1 a 5, sendo o primeiro o menos relevante e o último o mais relevante para o projeto;

- Em seguida deve-se realizar a soma dos critérios impacto, lucratividade e visão de cada ideia, subtraindo o critério esforço. Após isso deve-se adicionar esse resultado na coluna total;
- Com os resultados para cada ideia podemos adquirir a melhor de acordo com o maior resultado total entre elas.

Para analisar cada um dos critérios temos que sempre considerá-los individualmente como elementos que podem ou não analisar o andamento do projeto, e de que forma. Sendo assim, não é essencial obter nota máxima em todos os critérios para a ideia ser considerada a melhor, mas que possamos analisar adequadamente quais daqueles realmente são relevantes para o projeto, conseguindo assim o melhor equilíbrio possível.

2.6.3 Matriz QFD

Segundo HAUSER e CLAUNSIG, apud BACK e FORCELLINI (2002), a matriz QFD (*Quality Function Deployment*), ou casa da qualidade se refere a um mapa conceitual que permite um planejamento interfuncional e comunicativo entre os setores responsáveis pelo desenvolvimento do produto em todas as suas etapas. Essa é uma ferramenta bastante importante, pois já nas fases de projeto assegura uma determinada qualidade ao produto final por meio da consideração dos desejos dos clientes dentro das metas do projeto. Isso proporciona redução no número das mudanças de projeto, e ao mesmo tempo reduz os custos decorrentes das mudanças de projeto para estágios mais avançados.

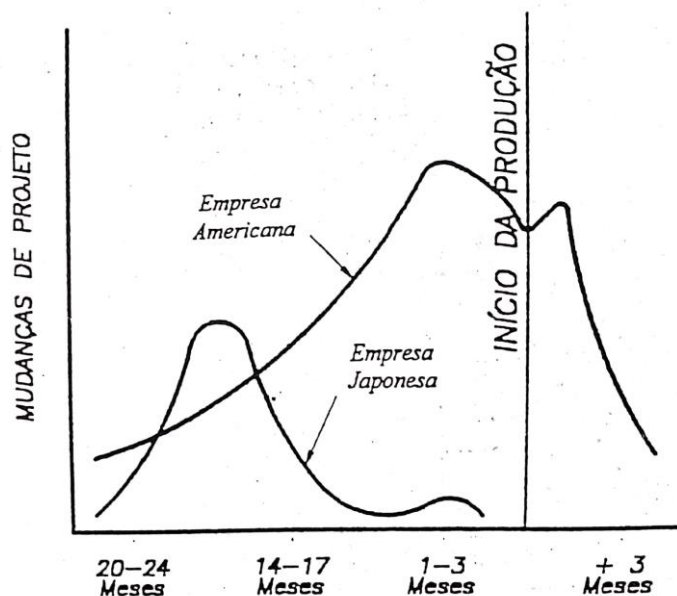
Dentre os principais benefícios do QFD estão:

- Redução do número de mudanças de projeto de 30% a 50%;
- Ciclo de projeto encurtado de 30% a 50%;
- Custos de início de operação (*start-up*) reduzidos de 20% a 60%;
- Redução de reclamações de garantia (mais de 50%);
- Planejamento da garantia de qualidade mais estável;
- Favorece a comunicação entre os diferentes agentes que atuam no desenvolvimento do produto, principalmente marketing e engenharia (projeto e manufatura);
- Traduz as vontades dos clientes que são vagas e não mensuráveis em características mensuráveis;
- Identifica as características que mais contribuem para os atributos de qualidade;

- Possibilita a percepção de quais características deverão receber maior atenção.

A Figura 21 mostra claramente a relação comparativa entre empresas que utilizam ou não o advento dessa ferramenta.

Figura 21 – Comparação das mudanças de projeto entre uma empresa norte americana (sem QFD) e uma empresa japonesa (com QFD).



Fonte: HAUSER e CLAUNSIG, apud BACK e FORCELLINI (2002).

Analisando o gráfico exposto acima podemos notar que a empresa japonesa possui um grande gasto inicial de projeto, pois justamente nessa fase que as metas são consideradas em cima das necessidades dos clientes, porém percebe-se com o tempo que os gastos a médio e longo prazo, com o projeto já finalizado, são muito maiores para a empresa americana que não utiliza o QFD, haja vista que a mesma deve apresentar muitas dificuldades, e conseqüentemente, muitos custos relacionados com adequação e atualização de projeto quando comparado a empresa japonesa que utiliza a ferramenta.

2.7 Sprinkler com princípio de efeito memória de forma

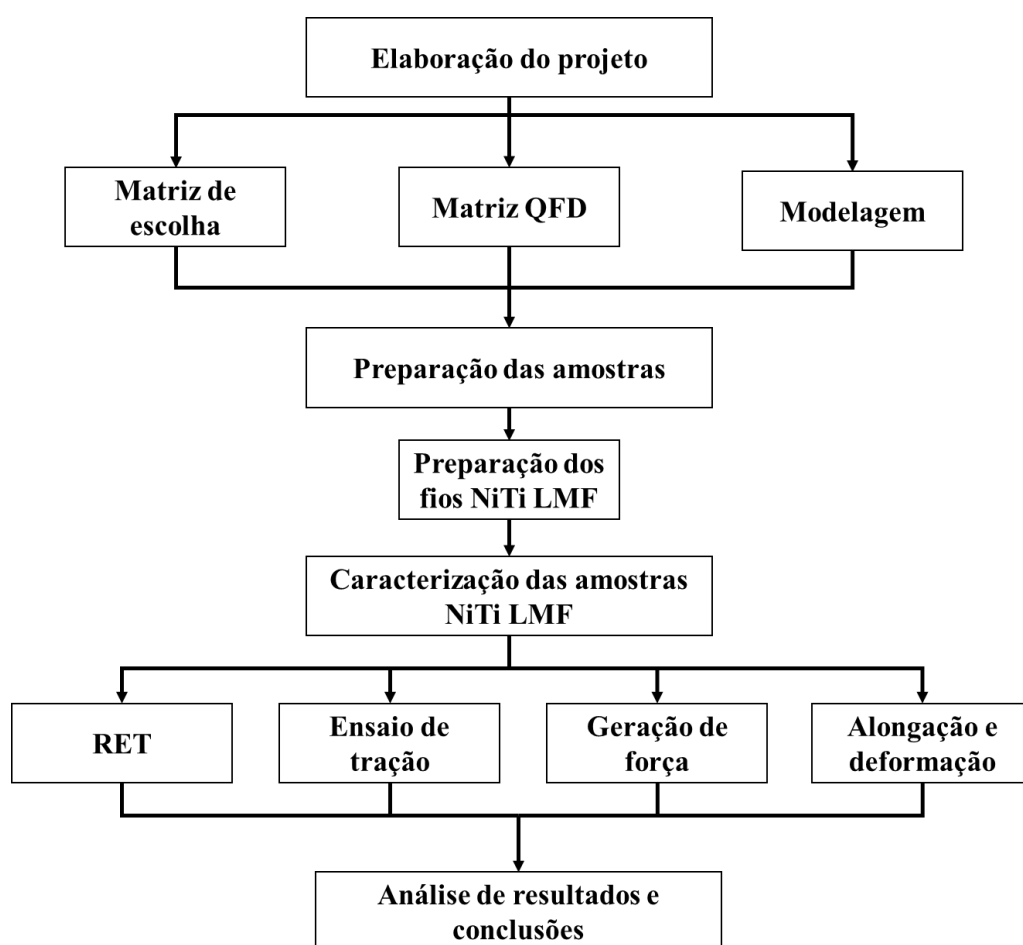
Este trabalho busca explorar a notável capacidade dos materiais inteligentes, particularmente as ligas NiTi com efeito de memória de forma. O objetivo é integrar essas ligas aos dispositivos de prevenção de incêndio, como os *Sprinklers*, também chamados de chuveiros automáticos, melhorando assim sua eficácia. Percebe-se a necessidade dos atuais sistemas construídos de bulbos termossensíveis em relação a sua durabilidade e

principalmente reutilização após funcionamento. Os fios LMF se mostram promissores nesse desafio e possuem a capacidade de substituição do sistema atual, pois funcionam como atuadores quando excitados pela variação de temperatura. E com um rigoroso processo de metodologia de projeto, estudo de mercado e adequado funcionamento em aplicações reais esse protótipo pode ser adaptado a necessidade que o estudo busca apresentar.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão abordados todos os procedimentos realizados para o desenvolvimento do projeto do *Sprinkler* com base na característica do efeito memória de forma. Dessa forma, o projeto desenvolvido pode apresentar uma reversibilidade buscada nessas aplicações. A Figura 22 ilustra detalhadamente o fluxograma de execução do projeto como um todo.

Figura 22 – Fluxograma de execução do projeto de dimensionamento de *Sprinkler* reutilizável através de ligas NiTi LMF.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1 Desenvolvimento do produto

Inicialmente foram desenvolvidas algumas etapas visando a consolidação do projeto e sua devida estruturação ao longo das etapas iniciais, bem como ao longo das fases de médio e longo prazo do projeto, visando que este se mostre com potencial relevante frente aos projetos já disponíveis no mercado.

Duas ferramentas foram utilizadas, a primeira foi a matriz de escolha ou decisão, dessa forma pode ser realizada uma breve e objetiva comparação entre os vários métodos de atuadores mecânicos, tendo como opções: os fluidos reológicos, magneto-reológicos, cerâmicas piezoelétricas e ligas com efeito memória de forma. Com isso, pode ser obtida a seleção do principal elemento constituinte do projeto.

Outra ferramenta utilizada foi a matriz QFD. Este artifício possibilitou uma melhor consolidação do projeto, pois direciona diretamente a necessidade do público-alvo, requerimentos necessários e pontos chave do projeto, fazendo com isso que o mesmo tenha um bom desenvolvimento a médio-longo prazo.

3.1.1 Etapa de modelagem do projeto

Nessa fase foram realizados os primeiros modelos referentes ao protótipo inicial, considerando um fio NiTi de 1 mm de espessura, por meio de *software* de modelagem *Solidworks 2022* (versão estudantil), como detalhado no desenho do projeto no ANEXO A. Dessa forma as posteriores etapas de fabricação e testagem serão mais facilitadas, haja vista que o projeto apresentará uma padronização de fabricação e um controle dimensional de forma que o protótipo obtido seja de acordo com o que foi pensado em projeto.

3.2 Materiais e Métodos

Nessa etapa foram realizados os passos referentes a obtenção, preparação e gestão das amostras, para que pudessem ser realizadas, inicialmente a caracterização das amostras e posteriormente o tratamento térmico, ensaio RET (resistência elétrica em função da temperatura), ensaio de tração, deformação, geração de força e planejamento experimental das amostras.

3.2.1 Preparação das amostras

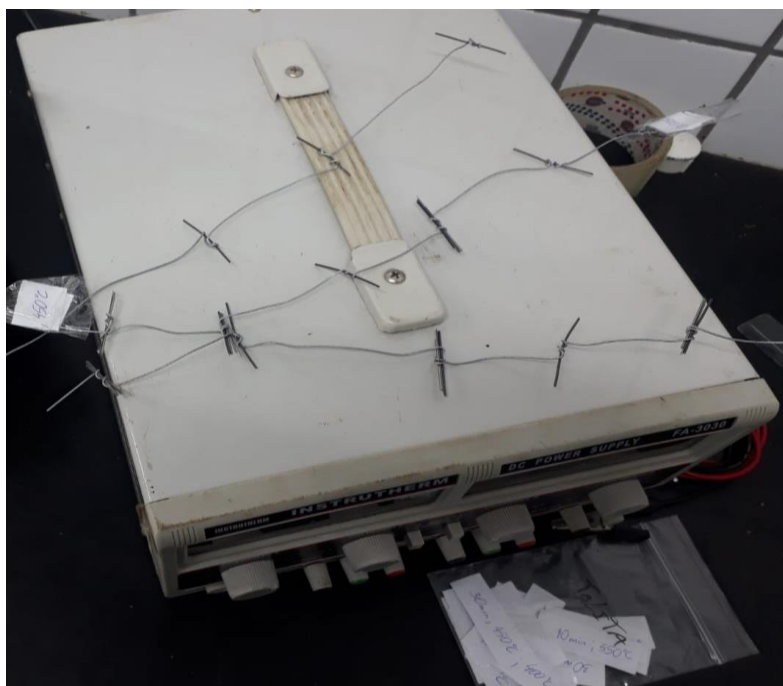
Inicialmente foram adquiridas amostras de fios NiTi LMF pelo fabricante KEYUE *Magnet & Materials*, esses fios apresentam diâmetro de 1 mm e temperatura de transformação de fase de aproximadamente 65 ± 5 °C. Em relação a temperatura de transformação de fase austenita-martensita foram utilizadas temperaturas em um escala de 45 a 90 °C, de forma a atender a aplicação fim de combate à incêndio de acordo com a norma NBR 10897. Essa escala de temperatura já está presente na descrição do fio, conforme ANEXO A.

Com as amostras disponíveis, foi realizada a preparação para a primeira caracterização, sendo cortadas com auxílio de alicate universal amostras de 3 cm, em um total de 20 unidades, conforme a demanda do estudo.

3.2.2 Caracterização das Amostras NiTi LMF

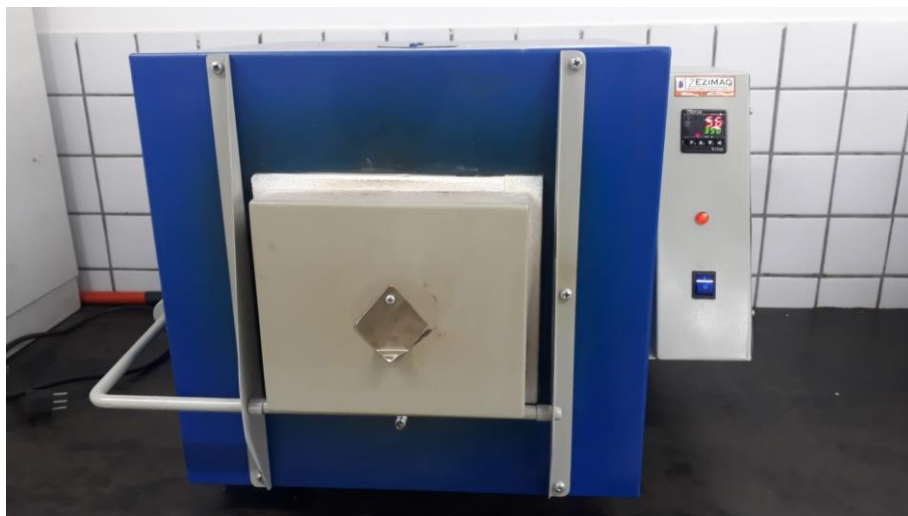
Nessa fase foi realizada uma varredura de parâmetros para obter temperaturas próximas as que a norma específica, demonstrando com isso a possibilidade de ajustes nessas temperaturas durante a atuação do constituinte. Como parâmetros iniciais temos tempo de: 15, 20, 25 e 30 min, temperaturas: 350, 400, 450, 500 e 550 °C, com base na metodologia de INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING ABCM (2017). Esses parâmetros foram utilizados para realização do tratamento térmico de têmpera, no qual as amostras foram colocadas no forno tipo mufla fabricado pela GP científica, do laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA campus Mossoró. Após ajustada a temperatura do forno as amostras permaneceriam de acordo com os tempos predeterminados e posteriormente seriam retiradas e postas a resfriarem ao ar calmo. Considerando os tempos propostos foram feitas 4 amostras para cada temperatura, totalizando 20 amostras. É apresentada na Figura 23 a preparação das amostras para o forno, para realizar o tratamento térmico e a Figura 24 mostra o modelo de forno utilizado.

Figura 23 – Preparação das amostras NiTi para ensaio de têmpera.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 24 – Realização de ensaio de têmpera em forno tipo mufla (GP Científica).



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2.3 Ensaio de RET (resistência elétrica x temperatura)

No que se refere a essa etapa busca-se realizar uma análise entre os valores obtidos de resistência elétrica, em função dos valores de temperatura coletados. É sabido que para dispositivos como extensômetros ou *straingauges* são obtidos valores de variação de resistência elétrica em função da deformação sofrida no componente, a finalidade do ensaio RET é semelhante, porém com ênfase na relação temperatura x resistência elétrica tomando como base a norma ASTM F2004-05.

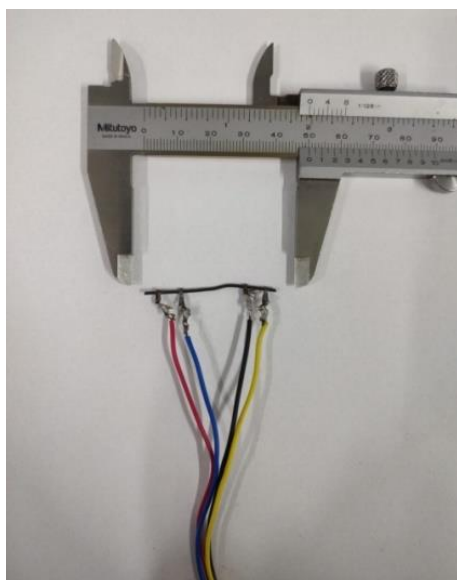
Inicialmente as amostras foram preparadas e soldadas a lâminas metálicas por microsoldadora KERNIT, modelo SMP 3000 GOLD, de forma que os dados pudessem ser coletados pelo aquisitor de dados, sendo os terminais das extremidades conectados a fonte de alimentação e os dois terminais internos conectados ao aquisitor de dados de forma a coletar a variação de resistência elétrica no fio. As Figuras 25 e 26 ilustram essas etapas.

Figura 25 – Microsoldadora KERNIT, SMP 3000 GOLD.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 26 – Arranjo das amostras preparadas para o RET.



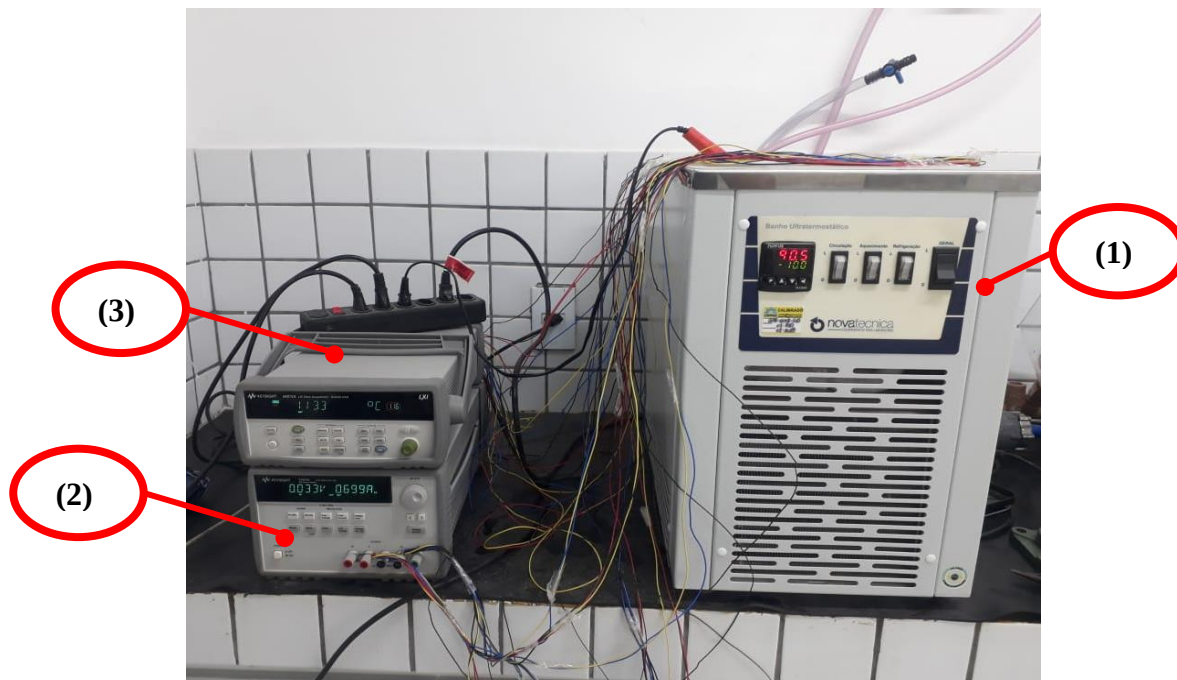
Fonte: Autoria própria (2023).

Para medição das temperaturas de transformação dos fios de NiTi, foram realizados ensaios utilizando um sistema de medição de resistência elétrica em função da temperatura (SMRT) desenvolvido por Reis et al (2006), como mostrado na Figura 27.

O SMRT consiste de um banho térmico regulável (1), uma fonte de alimentação em corrente contínua (2), um sistema de aquisição de dados (3) e um computador com programa de visualização dos dados coletados (4). O banho termo regulável ultratermostático, com refrigeração NT281 é da fabricante Nova Técnica (1). A fonte de alimentação de corrente contínua utilizada foi a KEYSIGHT E3633A (2), um aqisitor de dados modelo KEYSIGHT

34972A (3). E um computador *desktop* modelo DELL OptiPlex 3000 Micro. Conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 – Sistema de aquisição de dados e RET.

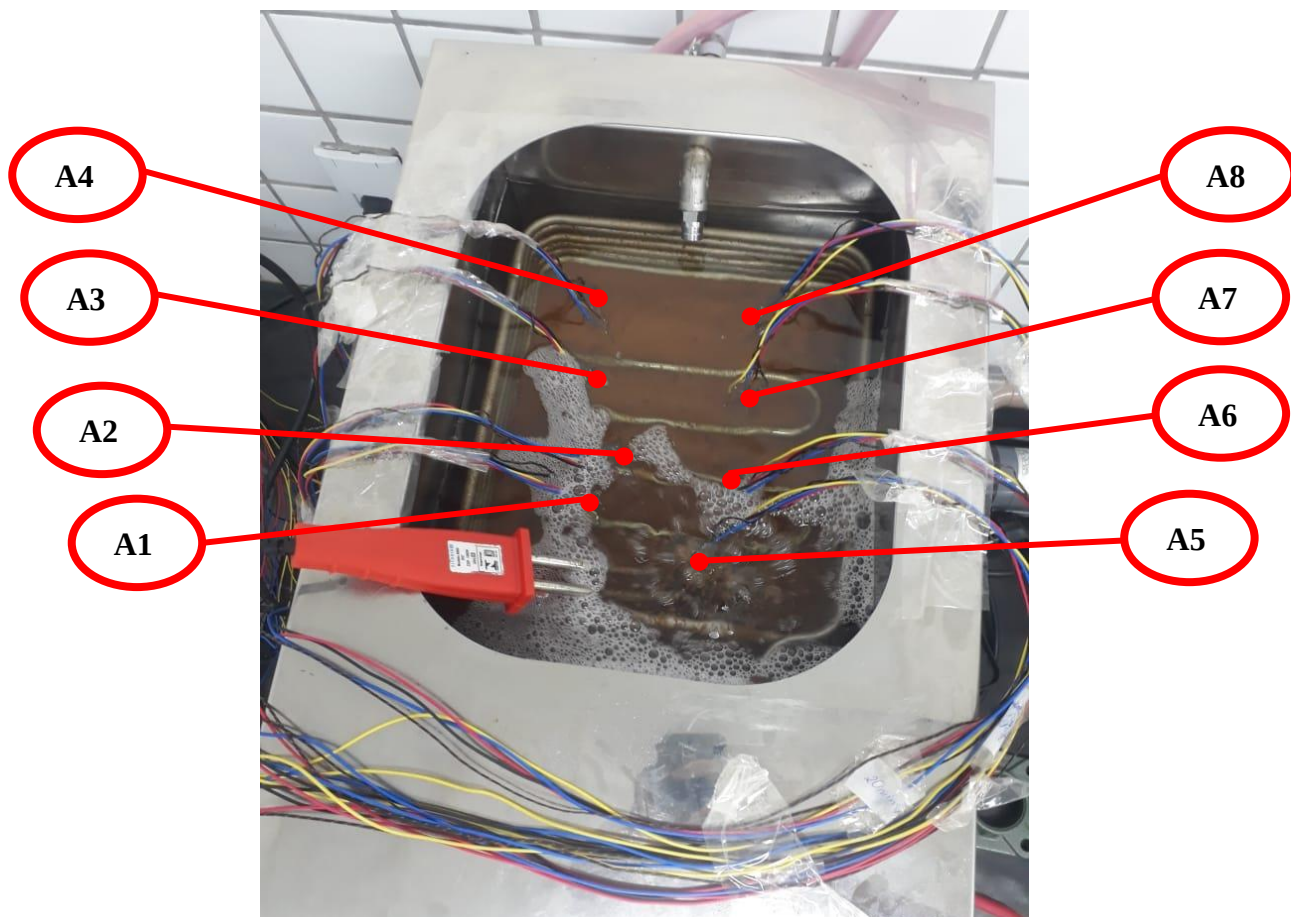


Fonte: Autoria própria (2023).

Com as amostras preparadas, os fios foram submersos no banho ultratermostático, como ilustrado na ‘Figura 28’, além do acompanhamento da temperatura por meio do próprio equipamento, também foram associados termopares tipo K a cada uma das amostras, de forma a coletar a variação de temperatura o mais próximo possível da localização do fio. Os terminais dos termopares, bem como os internos das amostras foram conectados a cada um dos canais disponíveis no aquisitor de dados, os quais foram identificados no *software* Agilent Benchlink, que permitia a coleta de dados em tempo real, após isso a análise foi realizada pelo método das tangentes, que permite a traçagem de retas tangentes aos pontos de inflexão das curvas e indica os pontos de transformação de fase através a interceptação dessas retas, conforme ASTM (F2082-06). Por fim, os resultados seriam plotados em *software* Origin, devido a densa quantidade de dados gerados. O procedimento seguiu uma padronização de 8 amostras por vez, de forma a viabilizar o tempo do experimento. A corrente elétrica utilizada no processo foi mantida constante em um valor de 0,3 A. E o ensaio se deu em 3 estágios, inicialmente um aquecimento até 100 °C, sendo o ponto inicial que as amostras deveriam ter no experimento, resfriamento até -10°C, em seguida um aquecimento final até o retorno da

temperatura de 100 °C, dessa forma todo ciclo de transformação das variadas amostras poderia ser considerado.

Figura 28 – Amostras mergulhadas no banho ultratermostático.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2.4 Planejamento experimental das amostras

Com os resultados dos ensaios RET realizados nas 20 amostras fez-se um planejamento experimental para obtenção de equações que governassem o comportamento da variação das temperaturas de transformação de fase com base no tratamento térmico aplicado. Para realizar essa etapa foi feita uma divisão das amostras em dois grupos: as amostras que possuíam a fase romboédrica e as que não apresentavam essa fase. Essa divisão foi realizada pelo fato de que o objetivo principal do trabalho é apresentar a capacidade de utilização da liga NiTi como atuador termomecânico, já que a fase R não se faz interessante para esse tipo de aplicação.

Considerando esses fatores foi realizado o DOE com *Central Composite, Non-Factorial, Surface Designer*, para gerar os pontos axiais da análise com dois fatores (A – Tempo e B – Temperatura), um bloco e 10 experimentos (2/1-10), e os parâmetros M_i , M_f , A_i e A_f que

correspondem as temperaturas de transição de fase. Dessa forma foi gerado o planejamento codificado mostrado na sessão de resultados e discussões, com limites inferior, superior e pontos axiais, positivo e negativo para as temperaturas de 450, 500 e 550°C e tempos de duração de 15, 20, 25 e 30 minutos. Posteriormente a isso, obtiveram-se os diagramas de pareto e suas respectivas superfícies de resposta para as temperaturas martensíticas e austeníticas, inicial e final, como pode ser observado na parte de resultados e discussões.

3.2.5 Realização do tratamento térmico ideal para o *sprinkler* termomecânico

Através das equações governantes adquiridas com os tratamentos térmicos iniciais foi possível obter a temperatura e o tempo ideal que atenderia os requisitos do fio NiTi se comportar como atuador termomecânico em aplicação, que deveria ser uma de 66°C para a austenita final, segundo a NBR 10897. Para isso, foram feitas iterações no *software Microsoft excel 2013*, com objetivo de atingir os níveis de temperatura desejados. Após isso o tratamento térmico foi aplicado em forno tipo mufla da GP científica e o ensaio RET realizado novamente de acordo com passo a passo já mencionado.

3.2.6 Ensaio de Geração de força, deslocamento e tração

Nessa etapa do projeto foi feita toda uma análise termomecânica nas amostras ajustadas de acordo com o que rege a NBR 10897 e com os parâmetros de entrada anteriormente coletados. Dessa forma, essa fase fica encarregada de trazer o verdadeiro potencial da liga NiTi como um atuador natural, que pode ser utilizado no projeto do *sprinkler* reutilizável.

Com o auxílio de máquina universal de ensaios de tração da marca EMIC, modelo DL 10000 (ajustada em velocidade deslocamento de 2 mm/min). E fonte de tensão de corrente contínua KEYSIGHT E3633A. Foi realizado o teste de geração de força nas amostras (100 mm de comprimento) para as porcentagens de 0,2 e 0,6 % de deformação. A execução do teste seguiu os seguintes passos: fixação da amostra no estado martensítico nas garras e inserção de parâmetros dos ensaios, aplicação da pré-deformação (0,2 e 0,6%), aquecimento do fio por efeito joule de forma a atingir a pré-deformação estabelecida, e aquisição de dados.

Para uma melhor fixação das amostras a máquina de ensaios de tração foram adicionadas lâminas de alumínio para gerar uma melhor aderência e assim evitar o escorregamento do fio ao ser tracionado.

A pré-deformação foi imposta pela máquina de ensaios através dos parâmetros pré-definidos. Após atingir a pré-deformação definida a máquina de ensaio para o teste e permanece com a carga e deformação aplicada. Após atingir a deformação estabelecida os

fios foram aquecidos através da passagem de potência elétrica suficiente para promover o aquecimento e transformação dos fios para a fase austenítica. Em paralelo ao aquecimento foi adquirido a força máxima gerada pelo fio. É apresentada na Figura 29 de forma detalhada a instrumentação desse ensaio.

Figura 29 – Ensaio de geração de força para as amostras RET 549,75 °C a 25,68 min.



Fonte: Autoria própria (2023).

Por fim, foi realizado ensaio de tração à temperatura ambiente de 26 °C e com os fios aquecidos por efeito Joule, seguindo parâmetros de entrada expostos anteriormente. Dessa forma, pode-se analisar o comportamento do fio até o seu rompimento, considerando sua fase elástica (sem deformações permanentes) e fase plástica (com deformações permanentes). Foram gerados gráficos para a estrutura martensítica e austenítica (obtida por efeito joule) do material, com o intuito de obter a variação entre os módulos de elasticidades de cada estrutura. A Figura 30 mostra um pouco desse ensaio.

Figura 30 – Ensaio de tração para as amostras RET 549,75 °C a 25,68 min.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para o teste de deformação recuperável foi utilizado um fio com um comprimento inicial de 1,67 m. A realização do ensaio foi feita fixando-se uma extremidade do fio e aplicando uma carga equivalente a 200 Mpa na outra extremidade, verificando-se uma deformação no fio, que foi medida na sequência. Por fim o fio foi aquecido por efeito Joule até recuperar o comprimento inicial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Matriz de escolha

Com o auxílio da ferramenta matriz de escolha, foi realizado um levantamento acerca dos principais atuadores termomecânicos que poderiam ser utilizados de forma a substituir com sucesso o bulbo termomecânico, sistema empregado no atual modelo de *sprinklers* comercialmente disponíveis. Ao analisar critérios importantes como: velocidade de resposta, sensibilidade, confiabilidade de ativação e custo. Pode-se perceber um melhor desempenho geral para as ligas com efeito memória de forma, como mostrado no Quadro 1. Sendo assim, o atuador termomecânico ideal para esse tipo de aplicação.

Quadro 1 – Matriz de escolha de atuadores termomecânicos.

CRITÉRIOS DE ANÁLISE	Velocidade de resposta	Sensibilidade	Confiabilidade de ativação	Custo	Total
PESOS	3	2	3	2	10
Componente (Atuador)					
Fluidos reológicos	7,5/22,5	8,5/17	6,5/19,5	7,5/15	74
Magneto-reológicos	8,0/24	9,0/18	7,0/21	6,5/13	76
Cerâmicas piezoelétricas	8,5/25,5	9,0/18	7,5/22,5	6,5/13	79
Ligas com efeito memória de forma	8,5/25,5	8,5/17	7,5/22,5	8,5/17	82

Fonte: Autoria própria (2023).

4.2 Matriz QFD

Nessa etapa foi realizado um apanhado de como o projeto se comportaria frente a possíveis públicos-alvo, bem como se o mesmo poderia adentrar e se manter no mercado a médio-longo prazo. De forma que o projeto possa entrar no mercado e se consolidar frente aos seus concorrentes, como estratégia inovadora e competitiva. Para isso, foi utilizada a ferramenta da matriz QFD, que mostrada detalhadamente através da relação e interrelação entre os requisitos como o projeto pode se manter estável e confiável. O Quadro 2 ilustra a matriz QFD para o projeto do *Sprinkler*.

Quadro 2 – Matriz QFD do *Sprinkler* por atuação de liga NITI.

REQUISITOS DA QUALIDADE			x x x y x				ANÁLISE DE MERCADO (Clientes)		
			Material	Sensibilidade	Confiabilidade de ativação	Durabilidade			
Necessidades do Cliente		Importância	Relação entre os requisitos				Concorrente 1	Concorrente 2	Concorrente 3
	Baixo Custo	3	3	3	3	3	4	3	5
	Utilização cíclica	5	5	3	5	5	5	3	4
	Confiabilidade de ativação	5	5	5	5	1	5	5	2
	Velocidade de Resposta	5	3	5	5	1	5	5	5
Análise Interna (técnicos)	Importância		3	5	5	5	Simbologia	Relação entre os requisitos	Interrelação entre os requisitos
	Empresa		4	5	5	5		(5) Forte relacionamento	(x) Positiva
	Concorrente 1		4	5	5	5		(3) Médio relacionamento	
	Concorrente 2		3	5	5	4		(1) Fraco relacionamento	(y) Negativa
	Concorrente 3		2	3	5	5		(0) Nulo relacionamento	

Fonte: Autoria própria (2023).

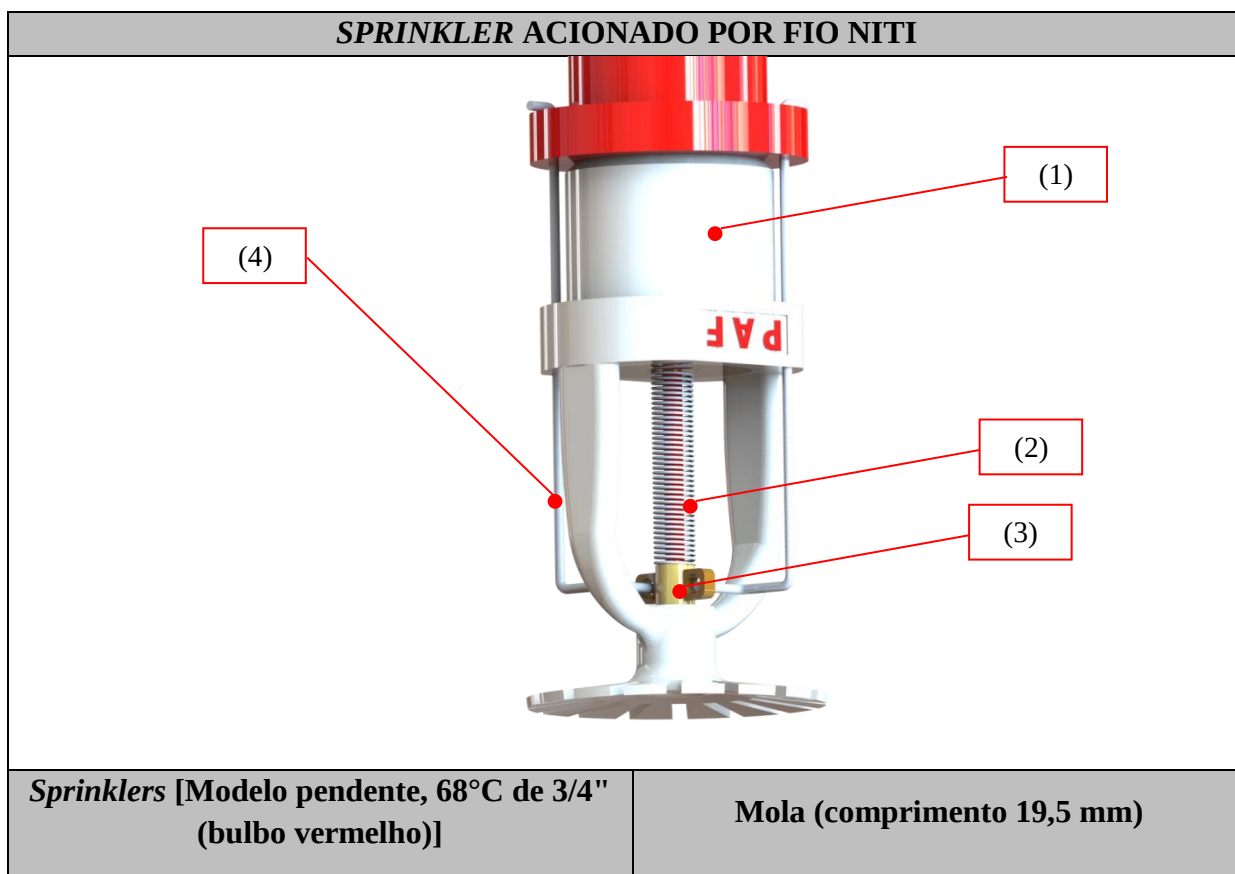
Fazendo a análise da matriz QFD é notada uma inter-relação positiva entre os requisitos material, sensibilidade, confiabilidade de ativação e durabilidade, apresentando apenas uma relação negativa da durabilidade com a sensibilidade, haja vista que são parâmetros inversamente proporcionais, pois é complexo atingir um nível de dispositivo durável que apresente uma sensibilidade muito elevada, pois esse necessita de uma robustez melhor.

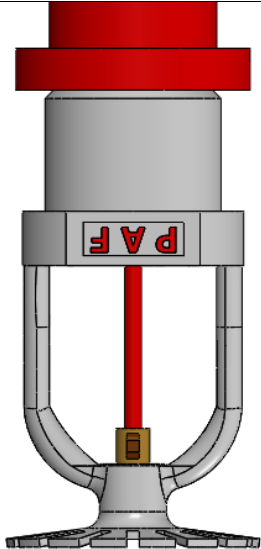
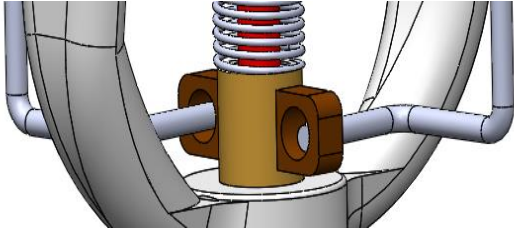
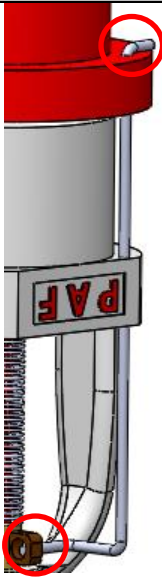
Em relação a projetos semelhantes, o concorrente 1 apresentou-se melhor posicionado frente aos requisitos do cliente e em relação análise interna de técnicos. Sendo um forte competidor de mercado do *sprinkler* reutilizável NITI.

4.3 Modelagem do protótipo

Com o auxílio de *software* de modelagem *solidworks 2022* (versão estudantil), o protótipo pode ser desenvolvido. O projeto buscou fazer uma adaptação de um *sprinkler* comercial (1) [modelo pendente, 68°C de 3/4" (bulbo vermelho) da marca Zeus do Brasil]. Com isso, foi substituída a ampola de vidro por um mecanismo de mola (2) conectada a dois suportes (3) ao atuador termomecânico (4), que seria o fio NiTi com ativação a 66°C, esse valor foi considerado segundo NBR 10897 e fazendo uma relação com os atuais modelos de chuveiros automáticos disponíveis no mercado, especialmente o de bulbo vermelho. Uma das extremidades do fio está conectada a estrutura do próprio *sprinkler* e outra está conectada ao dispositivo que realizará a compressão da mola e liberação da água pressurizada (4), como o fio NITI é de simples efeito o seu acionamento principal ficará a cargo da liberação da válvula, o retorno e fechamento da válvula de água serão realizados pela mola acoplada ao dispositivo (2) e (3). A Figura 31, mostra com mais detalhes esse projeto. Ilustrando a montagem geral e especificando cada componente de forma individual. Para mais detalhes do projeto no ANEXO A. É mostrado o desenho técnico dos componentes do projeto.

Figura 31 – Modelagem de dispositivo *Sprinkler* acionado por fio NiTi



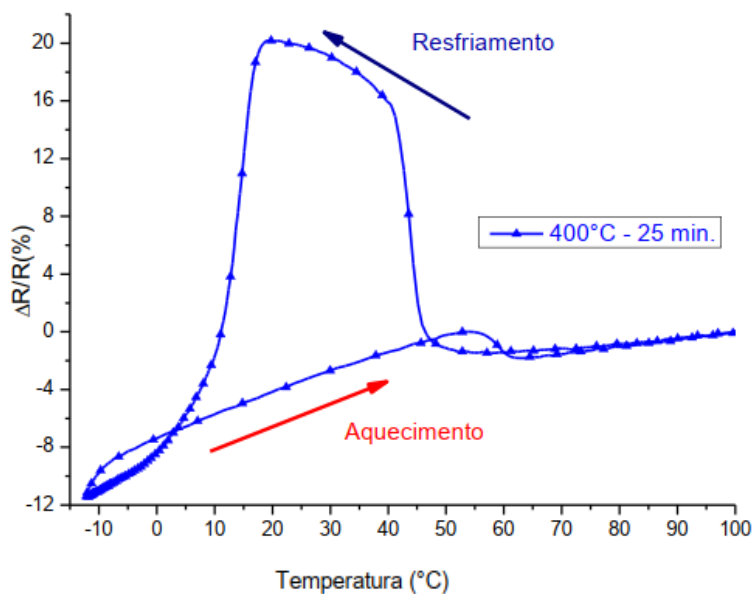
 (1)	 (2)
Dispositivo de Acionamento para compressão da mola e liberação da água pressurizada	Fio NITI (Atuador Termomecânico 66 °C)
 (3)	 (4)

Fonte: Autoria própria (2023).

4.4 Ensaio RET para caracterização das amostras

Com os resultados dos ensaios de RET realizados em amostras submetidas a diferentes tratamentos térmicos, produziu-se o gráfico característico de resistividade elétrica em função da temperatura. Na Figura 32 apresenta-se o gráfico plotado para a amostra tratada a 400 °C, com um tempo de tratamento de 25 minutos.

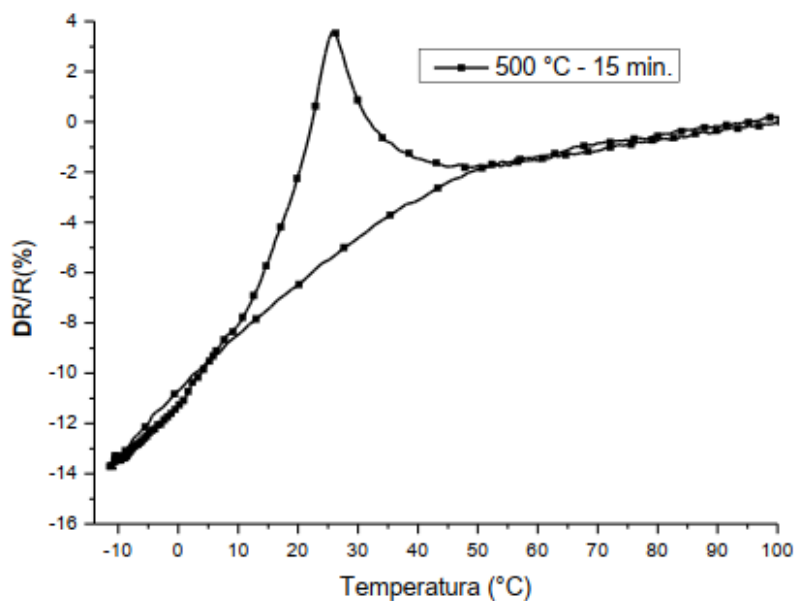
Figura 32 – Ensaio RET de amostra tratada termicamente a 400 °C, duração 25 min.



Fonte: Autoria própria (2023).

Analizando os gráficos obtidos após a realização dos ensaios RET para cada uma das temperaturas, foi possível observar as transformações de fase de austenita para martensita durante o resfriamento e de martensita para austenita durante o aquecimento. Em algumas amostras houve ainda a presença da fase romboédrica, conforme pode ser verificado na Figura 33. Já o tratamento de 500 °C e 15 min é mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Ensaio RET de amostra tratada termicamente a 500 °C, duração 15 min.



Fonte: Autoria própria (2023).

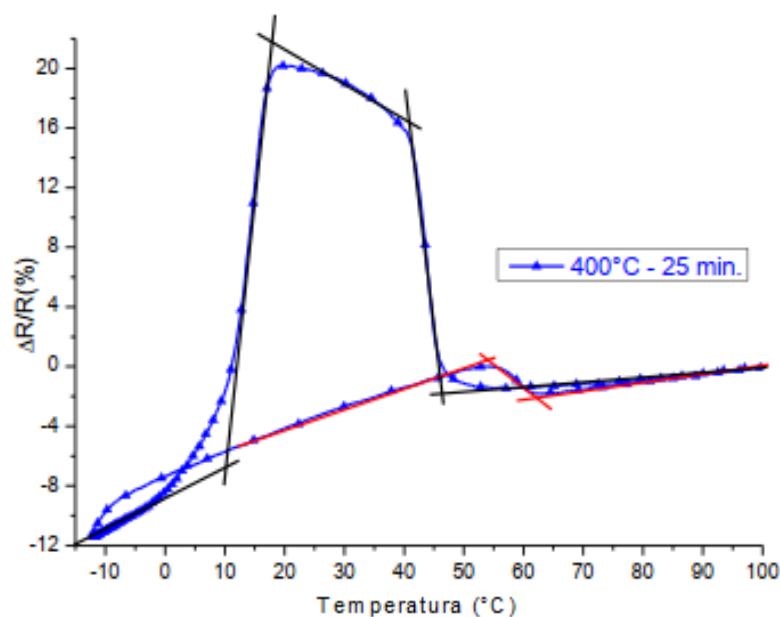
Através dos gráficos, observaram-se pontos de inflexão das curvas geradas, através da mudança de sentido da curva, isso indica uma variação da propriedade de resistividade com a alteração da microestrutura e consequentemente indica a mudança de fase da Liga.

Analizando o gráfico da Figura 32, pode ser observado o surgimento de uma fase entre a austenita e a martensita durante o resfriamento. A presença desse pico de inflexão adicional representa o surgimento da fase romboédrica, que seria uma transformação intermediária austenita-martensita. Esse aparecimento de uma fase intermediária é prevista pela literatura, conforme relatado por OTSUKA E WAYMAN (1998), dependendo da composição química e do tratamento térmico aplicado, pode haver a presença de outra fase, que aparece durante o resfriamento, denominado fase romboédrica. Esse fato é explicado devido ao surgimento de precipitados microestruturais, segundo WIGGERS (2011).

A Figura 33 apresenta o gráfico obtido para um tratamento térmico de 500 °C com período de duração de 15 minutos. Comparando com o tratamento anterior da Figura 32, é possível observar uma maior acentuação da inflexão quando a amostra é tratada com 500 °C. Esse comportamento de transformação da fase Austenita – Martensita não possibilita o surgimento da fase romboédrica. Considerando aplicações, como as do presente trabalho, de atuador termomecânico o surgimento da fase romboédrica não é um fenômeno desejável, pois além de levar um tempo maior e um consumo maior de energia para a atuação, esta se torna descontínua e não apresenta linearidade.

De acordo com ASTM E 794-06 e E 793-06 (2012), através da técnica das retas tangentes, pode ser obtida a temperatura de transição de fase, onde cada intersecção entre as retas representa uma temperatura de transformação de fase. Vale ressaltar que por ser um método de traçagem manual sobre as curvas geradas, os valores encontrados são apenas estimativas e não valores totalmente fechados. A Figura 34 ilustra como se dá esse método para um gráfico obtido para uma amostra tratada a 400 °C por 25 minutos.

Figura 34 – Ensaio RET de amostra tratada termicamente a 400 °C, duração 25 min (retas tangentes).



Fonte: Autoria própria (2023).

Com base nos gráficos obtidos no Anexo A e o método das tangentes, podem ser adquiridas todas as temperaturas de transformação de fase, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Temperaturas de transformação de fases obtidas por ensaios RET.

Temperatura (°C)	Tempo (min)	M _i (°C)	M _f (°C)	R _i (°C)	R _f (°C)	A _i (°C)	A _f (°C)
350	15	-2,39	-16,3	48,48	34,78	45,58	53,06
	20	12,98	4,15	53,26	47,43	48,07	55,55
	25	6,34	-0,94	31,25	28,55	38,3	46,18
	30	18,58	-3,64	46,61	42,89	49,11	53,26
400	15	20,88	-5,11	42,78	36,06	44,51	50,35
	20	7,23	-0,33	35,4	32,37	46,9	51,44
	25	17,85	8,53	46,45	41,91	52,53	63,36
	30	21,75	14,61	45,59	38	53,38	60,97
450	15	12,00	6,59	30,65	27,83	47,53	62,94

	20	23,93	17,85	45,15	41,48	54,26	64,44
	25	12,77	8,19	30,41	26,67	40,38	53,87
	30	39,34	21,27	-	-	52,62	61,98
500	15	34,98	26,30	-	-	36,91	52,1
	20	73,00	57,00	-	-	69,00	80,00
	25	22,42	11,53	-	-	21,27	29,37
	30	33,01	17,21	-	-	36,28	53,38
550	15	58,37	39,96	-	-	63,58	81,34
	20	37,05	3,41	-	-	43,71	67,79
	25	34,56	11,53	-	-	57,82	65,5
	30	42,47	15,04	-	-	61,35	69,67

Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando os resultados obtidos pela Tabela 3, é possível observar uma pequena tendência de deslocamento das curvas RET para a direita, conforme se aumenta a temperatura do tratamento, dessa forma apresentando um aumento na temperatura de inicialização da austenita. Além disso, é verificado que para os tratamentos de 500 e 550 °C, em todos os tempos aplicados, bem como para o tratamento de 450 °C na duração de 30 min, não houve o surgimento da fase romboédrica.

Esse fato ocorre, porque segundo CORNELIU, JIAN e MANFRED (2003) e DAVID, DIMITRIS (2001), eventos de ciclagem térmica e envelhecimento podem vir a facilitar o surgimento da transformação de fase romboédrica. Existem fatores que estão envolvidos no processo de decomposição das fases do material, dentre estes, os precipitados Ti_3Ni_4 . Este precipitado interage com as tensões internas do material, forçando o deslocamento da transformação martensítica para temperaturas mais baixas e permitindo a evolução da fase R.

Outro ponto a ser observado, é que a medida que aumenta a temperatura do tratamento térmico, tem uma presença cada vez maior da fase martensítica. Constata-se também que as maiores temperaturas de austenitização ocorreram em amostras que não apresentaram uma fase R e em temperaturas de tratamento superiores a 450 °C.

De forma a viabilizar a pesquisa, dos dados obtidos na Tabela 3, foram utilizados apenas os que não apresentaram a fase romboédrica, pois não seria interessante para aplicação como atuador termomecânico.

4.5 Planejamento codificado das amostras

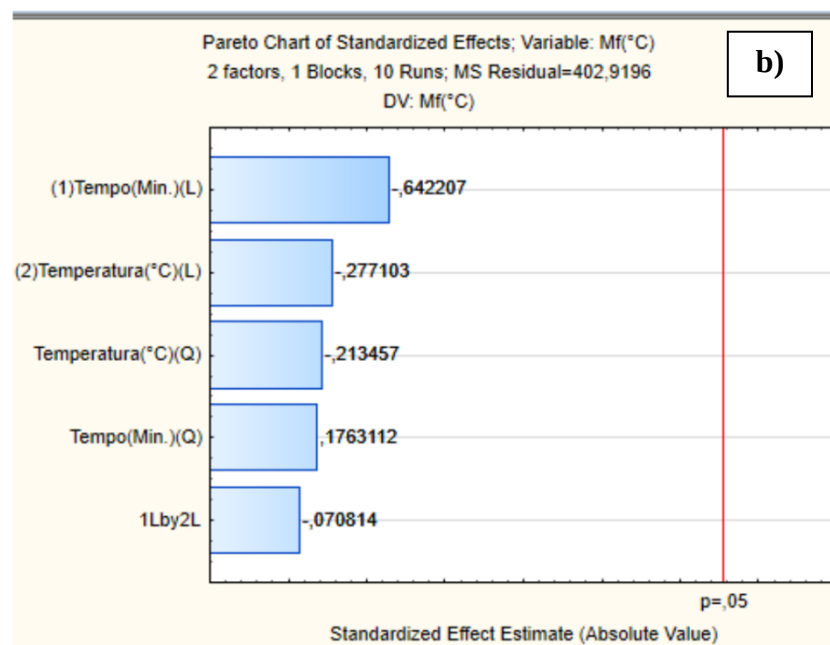
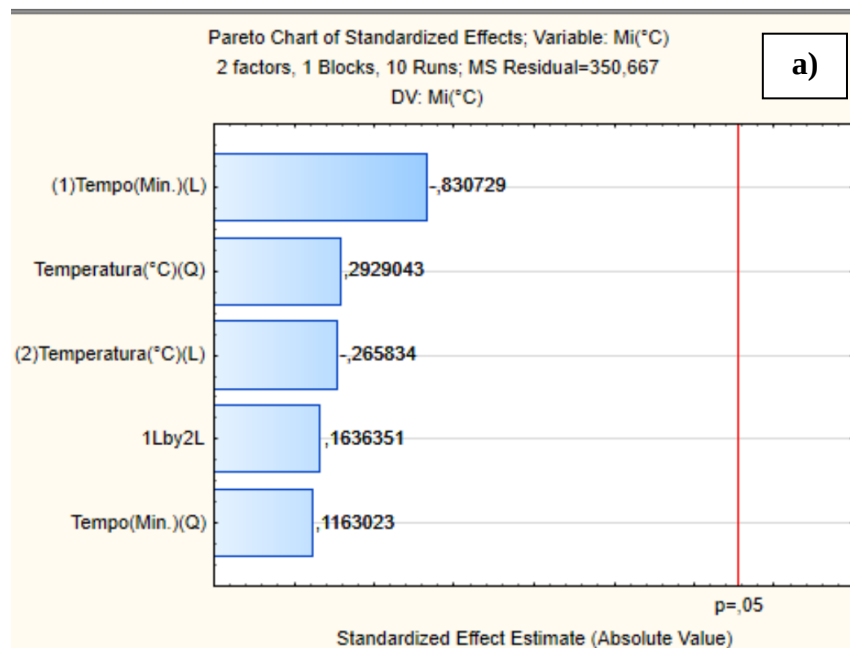
Com base no passo a passo realizado na etapa de materiais e métodos, foi obtido o planejamento codificado das amostras após a realização dos ensaios RET (Figura 35). E com isso, puderam ser obtidos os diagramas de Pareto para as temperaturas martensíticas e austeníticas, inicial e final, como mostra a Figura 36.

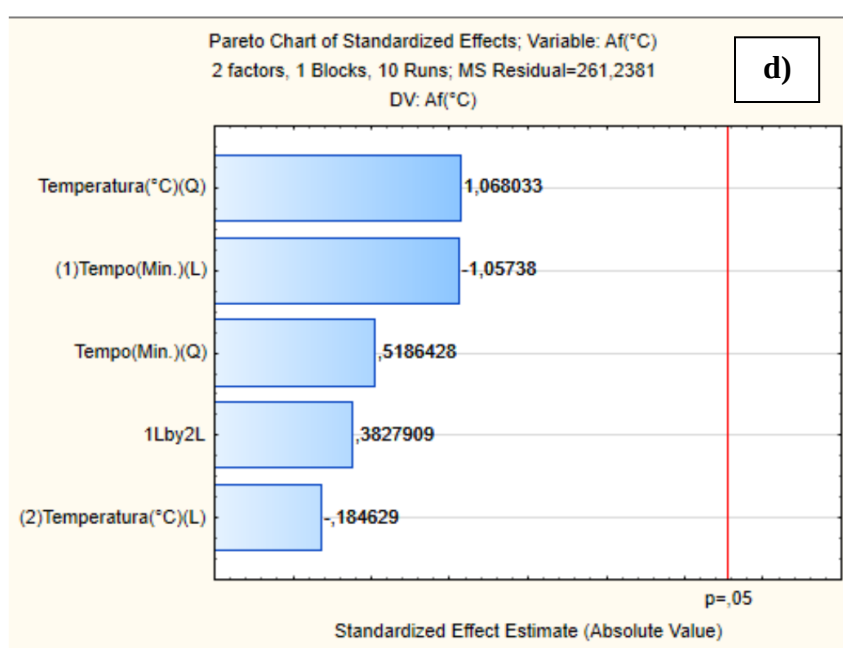
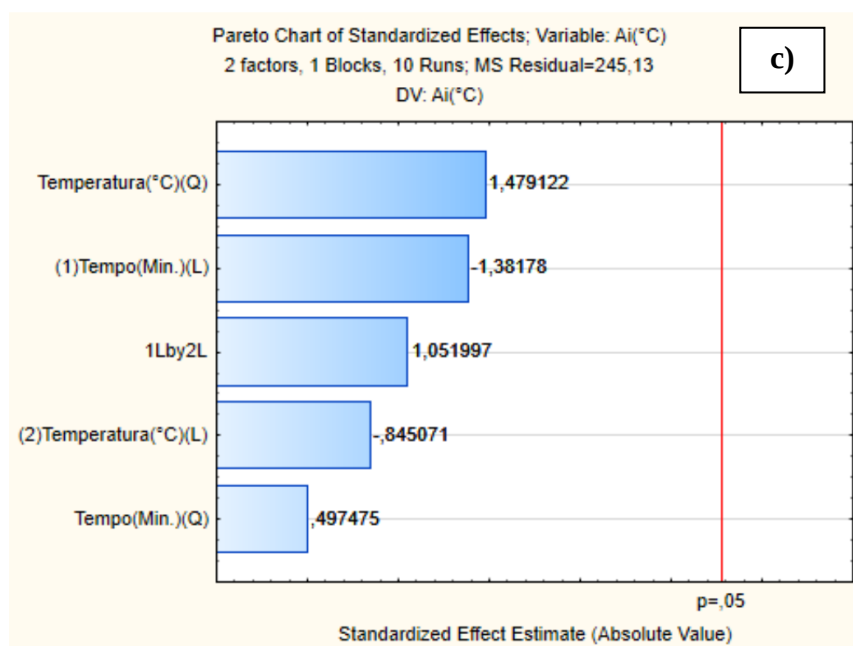
Figura 35 – Planejamento codificado das amostras com os resultados obtidos dos ensaios RET.

Standard Run	2**(2) central composite, nc=4 ns=4 n0=2 Runs=10 (Spreadsheet1)					
	Tepo(min)	Temperatura (°C)	Mi	Mf	Ai	Af
1	15,00000	500,0000	39,34	21,27	52,62	61,98
2	20,00000	500,0000	73,00	57,00	69,00	80,00
3	30,00000	550,0000	42,47	15,04	61,35	69,67
4	30,00000	500,0000	33,01	17,21	36,28	53,38
5	15,00000	550,0000	58,37	39,96	63,58	81,34
6	20,00000	550,0000	37,05	3,41	43,71	67,79
7	30,00000	450,0000	39,34	21,27	52,62	61,98
8	30,00000	450,0000	39,34	21,27	52,62	61,98
9 (C)	25,00000	500,0000	22,42	11,53	21,27	29,37
10 (C)	25,00000	550,0000	34,56	11,53	57,82	65,50

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 36 – Diagrama de Pareto com as temperaturas martensíticas (a) inicial e (b) final; e austeníticas (c) inicial e (d) final.



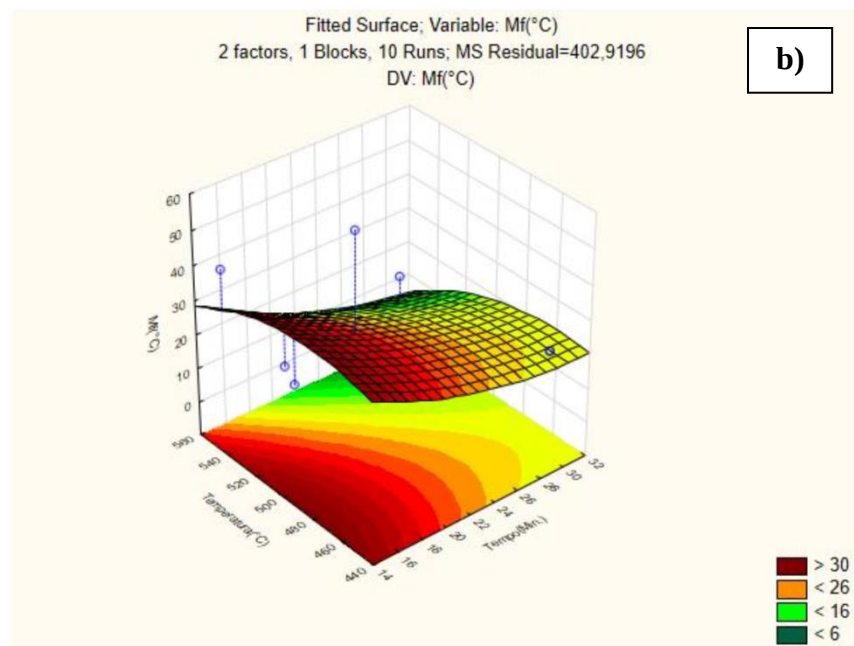
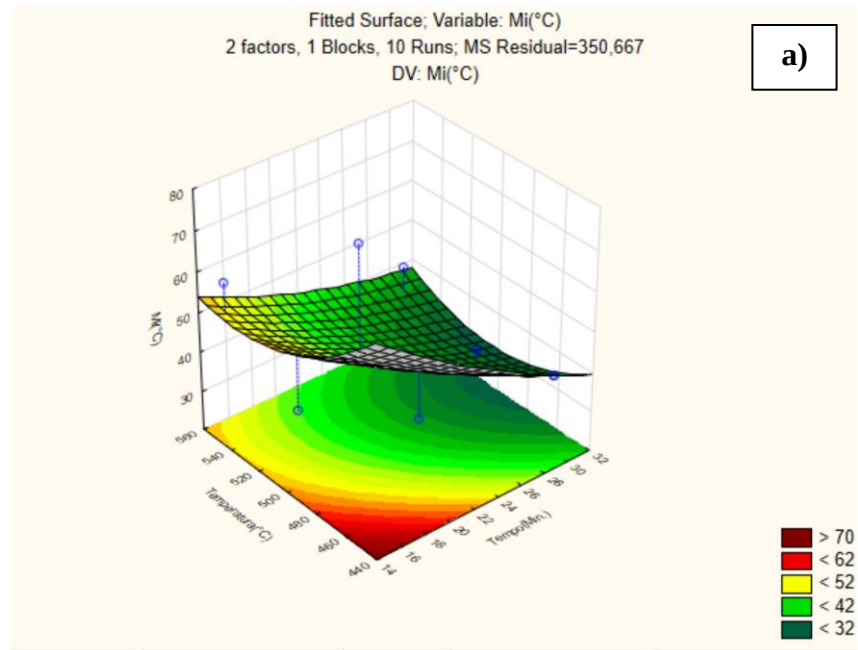


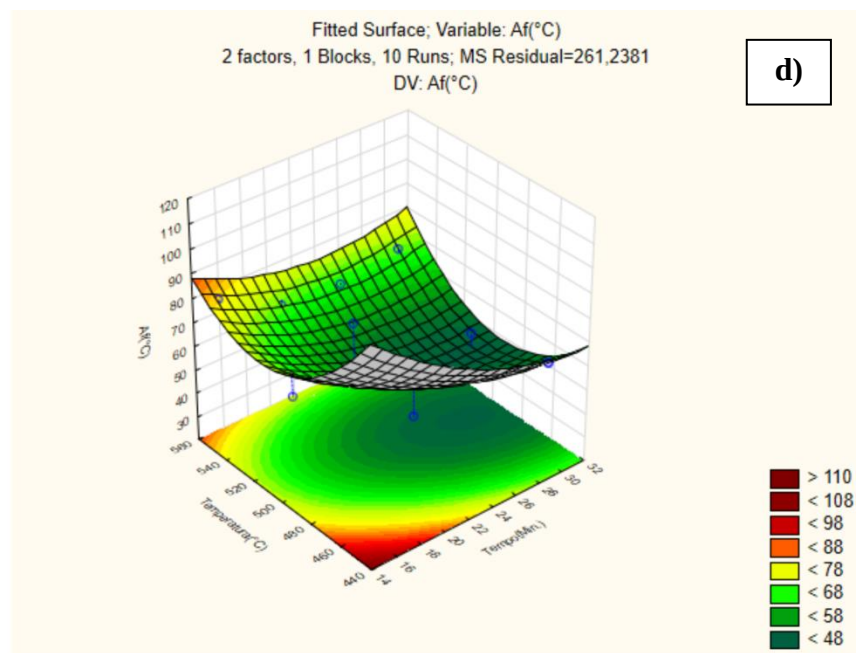
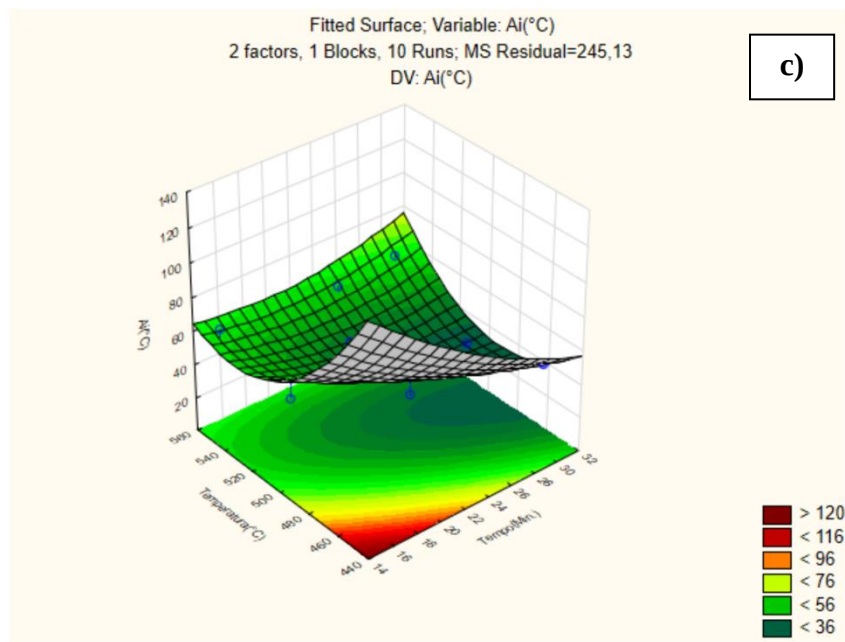
Fonte: Autoria própria (2023).

Através dos diagramas de Pareto foi possível observar que as temperaturas martensítica e austenítica iniciais tem uma dependência maior com a temperatura do tratamento térmico, como podem ser observadas nas Figuras 36 (a) e (c), já as temperatura martensítica final [Figura 36 (d)] apresenta uma maior dependência em relação ao tempo do tratamento térmico, entretanto essa dependência direta é relativamente baixa, o que se distancia de um

comportamento considerado linear. Na Figura 37, é possível observar as superfícies de resposta adquiridas a partir do diagrama de Pareto das amostras para cada temperatura.

Figura 37 – Superfície de resposta das amostras obtidas através do diagrama de Pareto com as temperaturas martensíticas (a) inicial e (b) final; e austeníticas (c) inicial e (d) final.





Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando as superfícies de resposta obtidas foi possível adquirir as 4 equações que governavam as transformações de fase em função dos parâmetros Tempo(x) e Temperatura(y) do tratamento térmico das temperaturas austeníticas e martensíticas, dessa forma esse parâmetros servem como informações preliminares para tratamentos térmicos posteriores, as equações obtidas são apresentadas abaixo:

$$(1) TM_i(x, y) = 776,08899999945 - 6,6533999999937x + 0,03079999999989x^2 \\ - 2,4904199999982y + 0,002227999999985y^2 \\ + 0,0077519999999891xy$$

$$(2) TM_f(x, y) = -349,93499999996 - 1,6072500000012x + 0,050050000000008x^2 \\ + 1,7230324999999y - 0,0017404499999999y^2 \\ - 0,003595999999985xy$$

$$(3) TA_i(x, y) = 3078,07499999979 - 27,725749999975x + 0,11014999999995x^2 \\ - 10,578272499993y + 0,0094068499999941y^2 \\ + 0,041667999999957xy$$

$$(4) TA_f(x, y) = 2102,36099999987 - 14,689349999985x + 0,11854999999997x^2 \\ - 7,4169724999957y + 0,0070120499999964y^2 \\ + 0,015651999999974xy$$

Apesar de não ser observado um comportamento linear, conforme constatado nos gráficos das superfícies de resposta e nas equações obtidas, pode-se comprovar que para maiores temperaturas de M_i , M_f , A_i e A_f serão obtidas para tratamentos térmicos em temperaturas mais elevadas e tempos de duração de tratamentos menores.

4.6 Definição de tratamento térmico ideal para a aplicação de *sprinkler* termomecânico

Com o auxílio das equações governantes do comportamento do tratamento térmico para as amostras, pode ser obtido o conjunto ideal de tratamento que atenderia o requisito de aplicação do *sprinkler* termomecânico, segundo a NBR 10897. Após os cálculos realizados, obteve-se a temperatura de 549,75 °C e duração de 25,68 min. Após setado os parâmetros de entrada no forno mufla, foi realizado o tratamento térmico e em seguida o ensaio RET da amostra, de forma a validar temperatura desejada. Vale ressaltar que apesar de ocorrerem algumas divergências quanto às temperaturas de martensíticas inicial e final, o objetivo principal do trabalho que seriam as temperaturas austeníticas, especialmente a final, temperatura de 66 °C segundo norma NBR 10897, foi alcançado com uma boa aproximação como mostra o gráfico RET da Figura 39. Dessa forma, o ensaio obteve as condições desejadas, apresentando temperatura ambiente na fase martensítica, não ocorrendo a fase

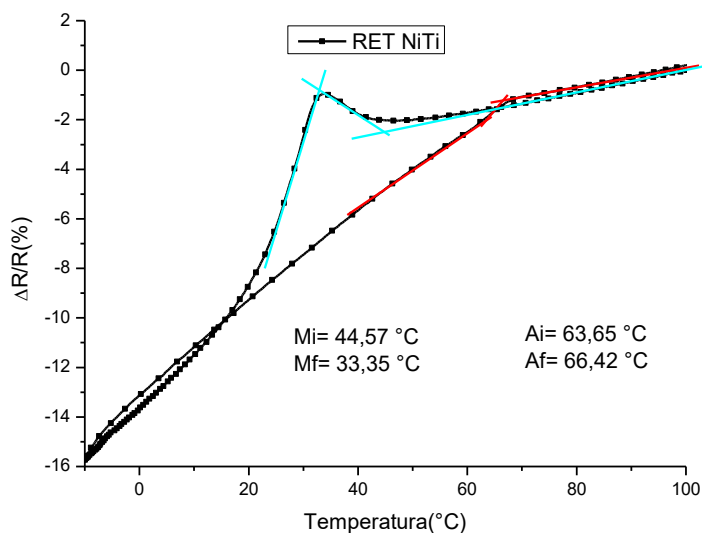
romboédrica que prejudica as aplicações de atuadores termomecânicos e atingindo a temperatura de austenita final de acordo com a norma de Sistemas de proteção contra incêndio por chuveiros automáticos. A Figura 38 mostrada abaixo, ilustra os *inputs* obtidos através das equações governantes.

Figura 38 – Iterações em *excel* para obtenção de parâmetro para o desenvolvimento do *sprinkler* NiTi.

x (tempo)	y (temperatura)	T _{mi} (°C)	T _{mf} (°C)	T _{ai} (°C)	T _{af}
25,68	549,75	39,23	12,2596	54,54937	66,02274

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 39 – Ensaio RET amostra 549,75 °C e duração de 25,68 min.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.7 Resultados do ensaio de geração de força

Com base na metodologia exposta em VILAR (2009), pode-se observar e comprovar pelo ensaio realizado, que os testes de geração de força para deformações de 0,2 %, 0,6 % e 1,0 %, apresentaram resultados semelhantes, dessa forma, nesse estudo adotou-se apenas a deformação de 0,2%. A Tabela 4 apresenta os resultados de força e tensão geradas após deformação de 0,2% e posterior aquecimento dos fios por efeito Joule. A tensão gerada foi calculada dividindo-se a força gerada pela área da secção transversal do fio NiTi.

Tabela 4 – Ensaio de geração de força deformação 0,2 %.

Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão Média (Mpa)	Desvio padrão (Mpa)
109	138,85	140,44 MPa	±2,75 MPa
115	138,85		
118	138,85		
114	145,22		

Fonte: Autoria própria (2023).

Observando o resultado coletado, a liga NITI apresenta-se satisfatória, quanto ao nível de força e tensão gerada, podendo ser utilizada na aplicação como atuador termomecânico do projeto. Vale ressaltar, que os gráficos desse teste não puderam ser plotados, pelo fato de que o equipamento utilizado não possui a função de aquisitar pontos com deslocamento zero, dessa forma aquisitou-se apenas os valores de força final gerados durante o aquecimento.

4.8 Resultados do ensaio de deformação recuperável

Nesse teste aplicou-se uma carga capaz de gerar uma tensão de 200 Mpa, conforme previsto em literatura e conforme apresentado em VILAR (2009). Após a aplicação da carga o fio que possuía inicialmente um total de 1,67 metros de comprimento útil, passou pelo processo de deformação longitudinal atingindo um valor de 1,77 metros, o que equivale a uma deformação de 0,10 metros. Esse percentual de deformação recuperável de 0,10 m ou 100 mm é considerado adequado, pois apresenta um comprimento utilização equivalente ao disponível no projeto. Nesse teste verificou-se que ao promover o aquecimento do fio por efeito Joule, o mesmo recuperou o seu comprimento inicial. Utilizando a Equação 5, obteve-se o valor da deformação recuperável de 6,11 %.

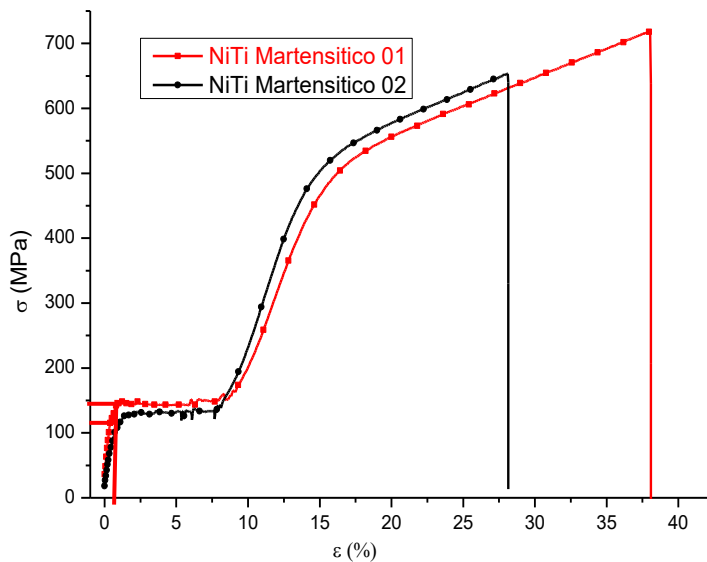
$$(5) \text{ Def. recuperável} = \frac{\text{deslocamento recuperado}}{\text{comprimento útil}} \times 100 = \frac{0,102}{1,67} \times 100\% \cong 6,11\%$$

Esse resultado aponta para uma propriedade de grande importância para o projeto proposto, visto que o fio NiTi com o tratamento térmico escolhido apresenta, além de grande capacidade de geração de força, uma grande capacidade de deformação recuperável, sendo ambas propriedades fundamentais para o atuador requerido.

4.9 Ensaio de tração para amostras martensíticas e austeníticas

Em relação ao ensaio de tração para as amostras martensíticas só foi possível a obtenção de duas amostras válidas, por questões de deslizamento e rompimento do fio na região da garra. Um fator importante a ser considerado é a tensão de *plateau*. Essa, segundo ANDREWS *et al* (2001), corresponde a uma região de deformação plástica, em que a estrutura se mantém com tensão constante em um valor de 1 %, enquanto as células se deformam continuamente. Essa é considerada uma área muito importante, pois se observa a maior quantidade de absorção de energia, bem como participa da formação da martensita através da austenita. A Figura 40 apresenta o gráfico do ensaio de tração para as amostras martensíticas. Essa característica é importante para o atuador, visto que poderá passar por grandes deformações nessa região, mantendo uma força praticamente constante. Para deformações nessa região, após o aquecimento para a transformação do fio NITI, haverá a recuperação do comprimento original.

Figura 40 – Ensaio de tração para amostras martensíticas (Temperatura ambiente).

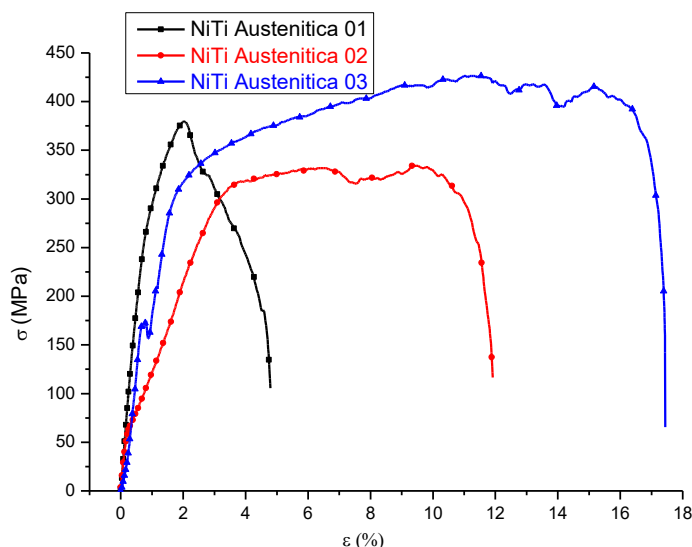


Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando a marcação através do ponto de tensão de *plateau*, aproximadamente 1% de deformação, é apresentado um valor de 149 MPa para a amostra 01 e 110 Mpa para amostra 02. Já para a obtenção das amostras austeníticas, foram aquecidas por efeito Joule, fazendo-se passar uma corrente elétrica pelos fios durante o teste. Observa-se através do gráfico da Figura 41, que o *plateau* de alinhamento martensítico desaparece e é apresentada apenas uma

inclinação na reta, apenas o teste 03 foi até o final. Nos ensaios 01 e 02 a amostra escorregou, devido ao fato de que ligas austeníticas apresentarem uma rigidez maior que martensíticas. Como pode ser observada na Tabela 5.

Figura 41 – Ensaio de tração para amostras Austeníticas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Através dos dados dos testes de tração foi possível calcular o módulo elástico das amostras nos dois estados (martensítica e austenítica). A Tabela 5 sumariza os valores obtidos. Pelos resultados é possível observar o grande aumento de módulo elástico, de acordo com NI *et al* (2007) e RAGHANVAN *et al* (2010).

Tabela 5 – Rigidez da liga NiTi.

Amostras	Martensítica	Austenítica	Fórmula Utilizada
Média	23,035 GPa	31,653 GPa	$(6)E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$
Desvio padrão	$\pm 7,985$ GPa	$\pm 1,24$ GPa	

Fonte: Autoria própria (2023).

4.10 Tabela de custos do projeto

De forma a finalizar e sanar possíveis dúvidas para uma posterior fabricação do protótipo, foi realizada uma cotação do projeto, visando sua futura manufatura. Como mostra a Tabela 6. Aliado a isso, é apresentado na Figura 42 um levantamento sobre a quantidade de incêndios registrados em edificações estruturais no Brasil entre os anos de 2012 à 2022. Observando os dados apresentados, obtém-se uma média de 1213,5 casos de incêndios por ano ocorrido nos últimos 10 anos, considerando que segundo a norma NBR 10897 a validade dos *Sprinklers* é

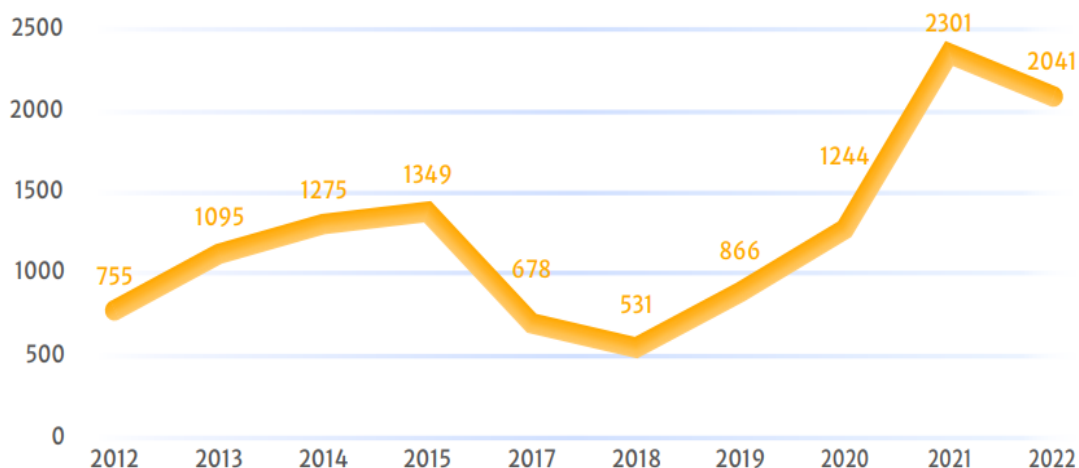
indeterminada, sendo apenas “recomendada” sua troca a cada 50 anos. Dessa forma se for considerado um número hipotético de 20 unidades de *sprinklers* por edificação chega-se a um valor de R\$ 1.055.502,30 para reposição desses instrumentos anualmente, chegando a um patamar ainda maior se forem analisados os 10 anos de registro. Já o *Sprinkler* a base de liga NITI teria uma utilização indeterminada, evitando assim esse custo com reposições.

Tabela 6 – Levantamento de custos do projeto.

Descrição	Valor Unitário	Valor Total
Liga NITI	R\$ 3,53	R\$ 141,54
<i>Sprinkler</i> pendente 68° ¾ (vermelho)	R\$ 43,29	R\$ 43,29
Base de fixação acionadora (material + usinagem)	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Valor total estimado por <i>sprinkler</i> NITI:		R\$ 96,82

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 42 – Notícias de incêndios estruturais por ano.



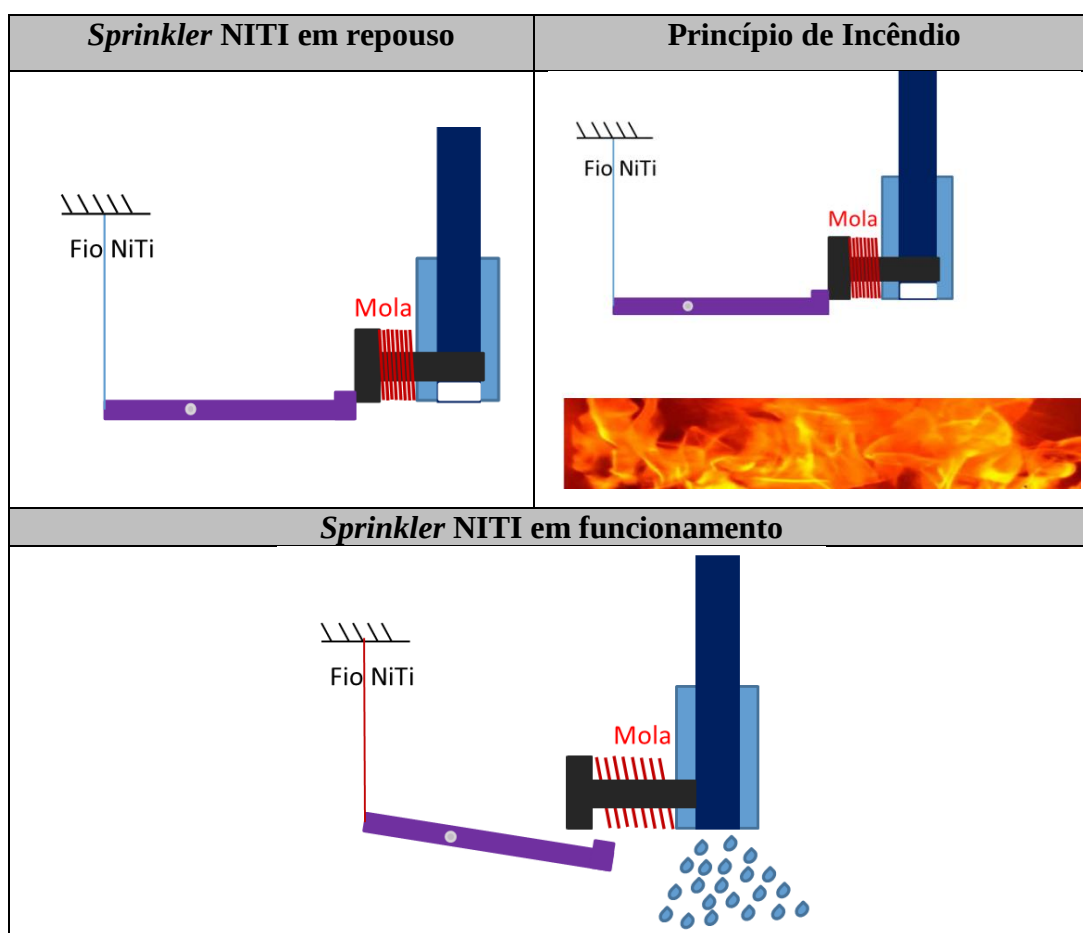
Fonte: Instituto *Sprinkler* Brasil (2023).

4.11 Projeto Conceitual

Com todas as etapas finalizadas e validadas o objetivo principal do presente estudo pode ser realizado. O modelo conceitual do projeto, que foi apresentado ao longo deste trabalho, tem como objetivo substituir os sistemas de *sprinklers* atuais que são fabricados com bulbo termossensível. Como mencionado anteriormente, este novo modelo busca oferecer uma alternativa mais eficiente e eficaz para os sistemas existentes. Esses elementos rompem em

funcionamento e são posteriormente descartados e substituídos, porém com a utilização da liga memória de forma NITI, esse processo pode ser reversível, através da característica de atuador termomecânico da liga. A ideia inicial do projeto foi pensada da seguinte forma. O fio seria conectado a válvula de saída de água pressurizada e controlaria seus movimentos de abertura e fechamento através da sensibilidade a flutuação de temperaturas da liga, como o fio é memória de forma de simples efeito, esse proporcionaria o acionamento do sistema, que retornaria a condição original através da atuação da mola conectada a haste. A Figura 43 apresenta a sequência de funcionamento pensado no projeto conceitual.

Figura 43 – Sequência de funcionamento do projeto conceitual.



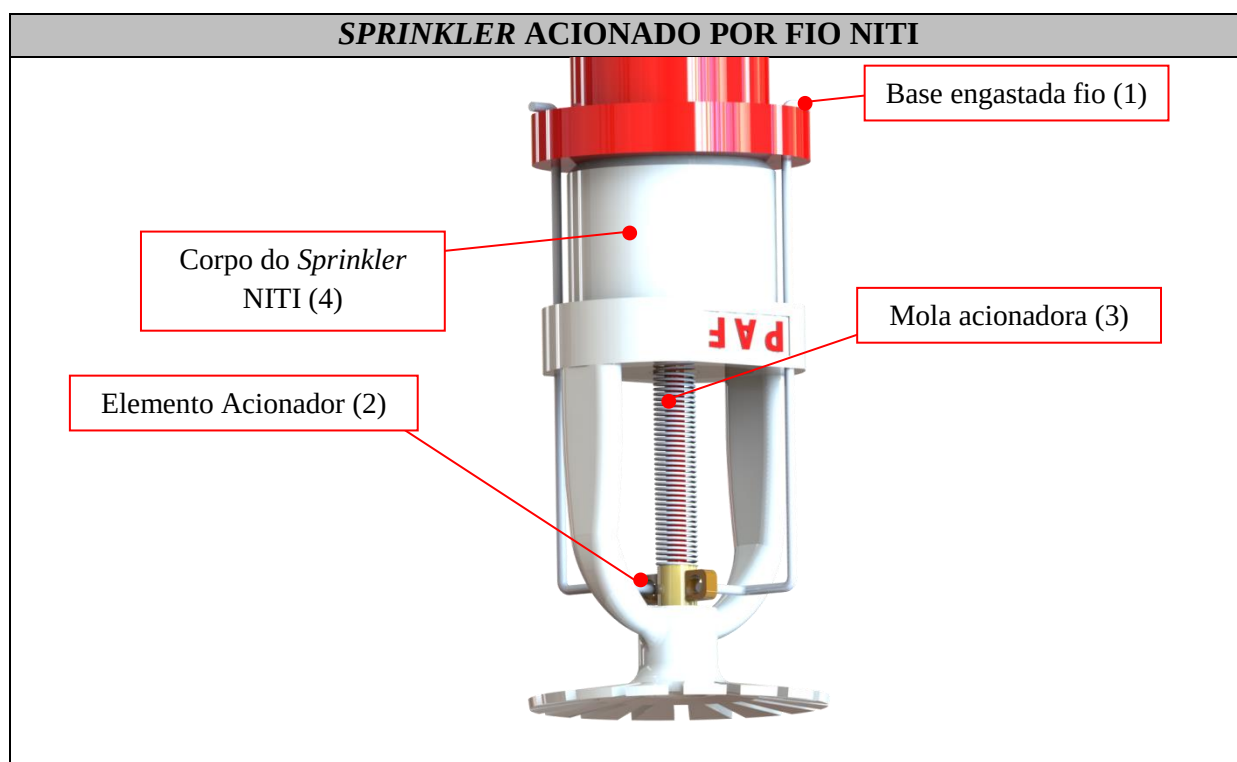
Fonte: Autoria própria (2021).

4.12 Funcionamento do projeto finalizado – *Sprinkler NITI*

Por fim, com o auxílio da modelagem 3D, foi possível obter, através da proposta do projeto conceitual um modelo real, fabricável, que apresenta todas as características elencadas nas premissas de projeto. Sendo elas: confiabilidade de ativação, durabilidade e principalmente reversibilidade, o grande diferencial do projeto.

Em relação ao princípio de funcionamento se apresenta muito semelhante ao do projeto conceitual, porém com elementos constitutivos diferentes. Primeiramente o fio de simples efeito está conectado a própria estrutura do *Sprinkler*, sendo que uma de suas extremidades é engastada e a outra realiza efetivamente a atuação termomecânica (1), essa deformação do fio somente ocorre ao ser atingida a temperatura de austenita final no valor de 66°C, com isso o fio de simples efeito realiza o acionamento do sistema, como ele está conectado ao suporte acionador (2), este comprime a mola, que então libera a água pressurizada, após ser estabilizado o incêndio e controlada a temperatura, a mola retorna a condição original e realiza o fechamento da válvula de liberação de água (3), tudo isso está envolto ao *sprinkler* e controla a sua atuação (4). Dessa forma o projeto atende a necessidade proposta de ser um *sprinkler* reutilizável. A Figura 44 mostra detalhadamente essa sequência de funcionamento do protótipo.

Figura 44 – Projeto finalizado *Sprinkler* NITI – memória de forma.



Fonte: Autoria própria (2023).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através desse estudo foi possível realizar toda uma metodologia de projeto para justificar a possível substituição dos atuais *sprinklers* fabricados com bulbos termosensíveis, por acionamento termomecânico pela liga NITI.

Além do projeto dimensionado, foi realizada toda uma caracterização da liga NITI, desde o ensaio RET das amostras iniciais com tratamentos térmicos em diferentes tempos e temperaturas, onde após analisado foi observado que o tratamento escolhido, que atenderia o valor de austenita final de 66° C segundo NBR 10897, foi o da liga submetida a uma temperatura de 549,75 °C e duração de 25,68 min. Esse valor foi obtido através de equações governantes das transformações de fase dos tratamentos térmicos. Após realizado o tratamento escolhido, outros ensaios foram realizados nas amostras como: geração de força, deformação recuperável e ensaio de tração. Onde se pode comprovar eficácia de utilização da proposta que o projeto buscava.

De forma geral, os objetivos foram alcançados, onde os resultados mostram que foi possível encontrar as temperaturas de transformação de fase e através delas obter equações governantes, que trouxeram o tratamento ideal, e assim através do novo ensaio RET e das análises termomecânicas se pode comprovar a ideia de reutilização do *sprinkler* através da liga NITI com a função de atuador termomecânico.

Como estudos futuros faz-se necessário realizar a fabricação e testes finais no protótipo, como tempo de resposta e abertura do sistema, para posterior encaminhamento para a maquinofatura em larga escala e patenteamento do projeto.

REFERÊNCIAS

_____. ABNT (2008): **NBR 10897** – Norma de Procedimento Técnico – Sistemas de proteção contra incêndio por chuveiros automáticos.

A. E. CORYELL. The Design Process: 12 Steps that turn Ideas Hardware. Machine Design, 9 de Novembro de 1967.

AFINKO POLIMEROS. **Ensaio Microscópicos**. Disponível em: < <https://afinkopolimeros.com.br/servicos/ensaios-laboratoriais/ensaios-microscopicos/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

ALIEXPRESS. **Fio NiTi D1.0 mm**. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/1005003298469410.html?srcSns=sns_. Acesso em: 13 jul. 2022.

ANDREWS, E. W., GLOUX., G., ONCK, P., GIBSON, L.J., “**Size effect in ductile cellular solids. Part II: experimental results**”, Internacionaç Journal of Mechanical Sciences 43, pp 701-713, 2001.

ASTM International. (2010). **Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis**. F 2004- 05.

ASTM International. (2012). **Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization by Differential Scanning Calorimetry**. E793-06.

ASTM International. (2012). **Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis**. E794-06.

ASTM International. (2015). **Standard Test Method for Determination of Transformation Temperature of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys by Bend and Free Recovery**. F2082- 06.

BRASEQ. **Reologia dos fluidos**. Disponível em: < <https://www.braseq.com.br/reologia-dos-fluidos>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRENTANO, T. **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações**. 3.ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. p.450.

BLOG BOMBEIROS CORPO. **Chuveiros automáticos (Sprinklers)**. Disponível em: < <http://bombeiroscorpo.blogspot.com/2016/09/chuveiro-automaticos-sistema-de.html>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

CERAMTEC. **Cerâmica como um transdutor eletromecânico**. Disponível em: < <https://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/piezoceramica.>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

Corneliu M. Craciunescu, Jian Li, Manfred Wuttig. Constrained martensitic transformations in TiNiCu films. Department of Materials and Nuclear Engineering, University of Maryland, College Park, USA, 2003.

_____. CSCIP/PR (2014): **NPT 003** – Norma de Procedimento Técnico – Terminologia de Segurança Contra Incêndio.

_____. CSCIP/PR (2014): **NPT 020** – Norma de Procedimento Técnico – Sinalização de Emergência.

DA SILVA, Ricardo. **Dimensionamento de rede de Sprinklers**. 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

David, A. M.; Dimitris, C. L. Influence of cold work and heat treatment on the shape memory effect and plastic strain development of NiTi. Materials science & engineering. A, Structural materials, 2001.

DUDEK, Olaf et al. Additive Manufacturing of Smart Composite Structures Based on Flexinol Wires. **Materials**, Polônia, n. 15, p. 499, 10 jan. 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/ma15020499>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/2/499>. Acesso em: 19 abr. 2023.

EARLY ENGENHARIA. **Sistema de Spinklers**. Disponível em: < <https://earlyengenharia.com.br/servicos/sistema-de-sprinklers/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

FRANCO, Gislaíne; *et al.* Incêndio e pânico no Brasil: um estudo sistemático quanto ao papel do engenheiro na garantia das condições de segurança e nas medidas contra incêndio. **Revista Científica da Ajes**, Juína – MT, v. 8, n. 17, p. 43 – 55, 2019.

GIFEL Engenharia de Incêndio. Disponível em: <<http://www.gifel.com.br>>. Acesso em: fevereiro de 2022.

HIDROMON – Sistema de Hidrantes e Mangotinhos. Disponível em: <<https://www.hidromon.com.br/sistema-hidrantes-mangotinhos-combate-incendio>>. Acesso em: fevereiro de 2022.

INBEP – Cursos de Segurança do Trabalho. Disponível em: <<http://blog.inbep.com.br/os-3-metodos-de-extincao-de-fogo/>>. Acesso em: 22 fev 2022.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL. **Estatísticas Gerais**. [S. l.], 2023. Disponível em:<<https://sprinklerbrasil.org.br/estatisticas-gerais/>>. Acesso em: 18 jul. 2023..

INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING ABCM, 24. 2017, Curitiba. Anais [...]. Curitiba, PR: ABCM, 2017.Tema: Study of the effect of heat treatment on a NITI alloy.

KO, J.M., NI, Y.Q., CHENM, Z.Q., SPENCER, B.F., “Implementation of MR Dampers to Dpongtng Lake Bridge for Cable Vibration Mitigation”, In: World Conference on Structural Control, Jonh Wiley & Sons, 2003, v.3, p. 767-775.

LEICA; **Estruturas Inteligentes**. Disponível em <<http://www.mec.ita.br/leica/ei.htm>>, Acesso em: fev.2022.

LIMA, Alexandre Silva. **Identificação experimental de um sistema magneto-reológico**. 2011. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LU, X. L.; CAI, W.; ZHAO, L. C.; **Damping behavior of a Ti₄₄Ni₄₇Nb₉ shape memory alloy**. Journal of Materials Science Letters, Vol. 22, p. 1243-1245, 2003.

MACEDO, Miguel Cabral; GOMES, Íverton Rodrigo; SOUZA, Luiz Guilherme. **Caracterização de amostras por microscopia óptica e por microdureza de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos**. Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS. Vol. 02, n. 03, pp. 48-61. Julho/Dezembro de 2015.

MATA, Diogo Francisco. **Análise das medidas de segurança contra incêndio em um condomínio residencial multifamiliar**. 2018. 59 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

MEACHAM, Brian J.; MCNAMEE, Margaret. Handbook of Fire and the Environment: Impacts and Mitigation. In: MEACHAM, Brian J.; MCNAMEE, Margaret. **Handbook of Fire and the Environment: Impacts and Mitigation**. 1ª . ed. [S. l.]: Springer, 2022. p. 55-100. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-94356-1_3#citeas. Acesso em: 31 jul. 2022.

MENARD, K.; **Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction**. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 2007.

NAGAI, H.; OISHI, R.; **Shape Memory Alloys as Strain Sensors in Composites**. Smart Materials and Structures, v. 15, pp. 493–498, 2006.

NEIVA DE MELLO PORTUGAL, Diogo. **Análise das Instalações de Proteção Contra Incêndio em Conjunto de Barracões Comerciais na Cidade de Curitiba**. 2014. Monografia (Especialização no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho) -Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR. Curitiba, 2014.

NI, Q.; ZHANG, R.; NATSUKI, T.; IWAMOTO, M.; **Stiffness and vibration characteristics of SMA/ER3 composites with shape memory alloy short fibers**. Composite Structures; Vol. 79, pp. 501–507; 2007.

ONO, R. **Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos**. 2007. 17 p. Artigo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAUUSP, São Paulo, 2007.

ONO, R. **Proteção do Patrimônio histórico-cultural contra incêndio em edificações de interesse de preservação**. 2004. 11 p. Artigo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAUUSP, São Paulo, 2004.

ORNAGHI JUNIOR, H. L.; **Caracterização Mecânica e Mecânica dinâmica de Compósitos Híbridos Vidro/Sisal Moldados por RTM**. Porto Alegre, pp. 1-80, 2009. Dissertação de mestrado.

OTSUKA, K., WAYMAN, CM., **Shape Memory Materials**. 1 a ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 284,1998.

PASTORINO – Segurança contra incêndios. Disponível em: <<http://www.pastorinoseguridad.com.ar>>. Acesso em: fevereiro de 2022.

PENG, H.B; *et al* .**Evolution of shape memory effect with aging time during aging after pre-strain in Fe–Mn–Si–Cr–Ni–C shape memory alloys**. ScienceDirect. Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing, 2022, Vol.852, p.143675, Article 143675

PEREIRA, Thereza Mylene. **Caracterização térmica (TG/DTG, DTA, DSC, DSC-fotovisual) de hormônios bioidênticos (estriol e estradiol)**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte.

PIERRE-MARIE Pédrot and NICOLAS Tabareau. 2020. **The Fire Triangle: How to Mix Substitution, Dependent Elimination, and Effects**. Proc. ACM Program. Lang. 4, POPL, Artigo 58 (Janeiro 2020), 28 páginas. <<https://doi.org/10.1145/3371126>>. Acesso em: Fevereiro de 2023.

Raghavan, J., Bartkiewicz, T., Boyko, S., Kupriyanov, M., Rajapakse, N., Yu, B; **Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites.** Composites: Part B, V.41, pp. 214–222, 2010.

RAKSHITH, B. Sreesha et al. An experimental investigation on performance of NiTi-based shape memory alloy 4D printed actuators for bending application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], 2 ago. 2022. 122, p. 4421-4436. DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09875-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09875-w>. Acesso em: 25 maio 2023.

REDESUL. **Tipos De Extintores De Incêndio E Suas Aplicações.** [S. l.], 2021. Disponível em: https://cartaoredesul.com.br/blog/tipos_de_extintores_de_incendio_e_suas_aplicacoes. Acesso em: 23 jun. 2023.

REIS, R. P. B.; DE ARAÚJO, C. J.; SILVA, L. A. R.; QUEIROGA, S. L. M.; **Desenvolvimento de um Sistema de Medição da Variação de Resistência Elétrica em Função da Temperatura: Aplicação a Caracterização de Ligas com Memória de Forma.** Anais do Quarto Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2006), Recife – PE, Brasil, pp. 1 – 10, 2006.

RUSSEL, Scott M. Nitinol melting and fabrication. . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SHAPE MEMORY AND SUPERELASTIC TECHNOLOGIES, SMST-2000, Asilomar, CA, USA, maio de 2000, p.361-366. **Proceedings**. NDC, CA., p.1-9, 2000.

SANTOS, Angelo. **Como vender Projetos de Combate à Incêndio e Pânico todos os dias – Passo a Passo.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://blogdaengenharia.com/especiais/carreira/mercado-de-trabalho/engenheiro-consultor/como-vender-pscip/>. Acesso em: 13 jun. 2023.

SILVEIRA, André Luis. **Atuador mecânico.** Disponível em: <http://www.um.pro.br/acionamentos/index.php?c=atuadoresmecnicos#:~:text=O%20atuador%20mec%C3%A2nico%20%C3%A9%20um,desligada%20por%20um%20sistema%20automatizado.>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

SIQUEIRA, Nathália Cordeiro. CORDEIRO, Edimando. **A importância do projeto de combate ao incêndio e pânico: Estudo de caso na Estácio Niterói (Bloco A)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 03, Vol. 03, pp. 91-126. Março de 2020.

SKOP. **Sprinklers: o guia essencial**. Disponível em: <<http://www.skop.com.br/2018/05/29/sprinklers-o-guia-essencial/#:~:text=O%20princ%C3%ADpio%20de%20funcionamento%20do,ou%20temperatura%20nominal%20do%20sprinkler.>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

SPADA, Alexandre. **Matriz de decisão: A ferramenta ideal para decisões rápidas**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://blog.sforweb.com.br/matriz-de-decisao-a-ferramenta-ideal-para-decisoes-rapidas/>>. Acesso em: 11 Jun. 2020.

TECNOLOGIA MONINO. **Nitinol**. Disponível em: <<https://tecnologiamonino.blogspot.com/2018/04/nitinol.html>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

UFRGS. **Análise dinâmico mecânica (DMA)**. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/lapol/dma.htm>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

VILAR, Zoroastro Torres. **Comportamento Eletro-termomecânico de um Compósito Ativo de CFRP com fios Ni-Ti Embebidos**. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.

VILAR, Zoroastro Torres. **Compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono (CFRP) incorporando fios atuadores de NiTi com memória de forma: caracterização termomecânica usando análise mecânica dinâmica (DMA)**. 2013. 176 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.

VILLARINHO, Denis Jardim. **Caracterização de uma liga NiTi visando confecção e aplicação como material biomédico em órtese Grampo de Judet**. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

WIGGERS, William de Souza. **EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO TÉRMICO DE FIOS DE NiTi CONFORMADOS A FRIO NA TEMPERATURA FINAL DE TRANSFORMAÇÃO AUSTENÍTICA**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2011.

ZHANG, S.; MCCORMICK , P. G.; **Thermodynamic Analysis of Shape Memory Phenomena – II: Modelling**. Acta Mater, v. 48, pp. 3091-3101, 2000b.

ANEXO A

- PROJETO DETALHADO DO SRPINKLER

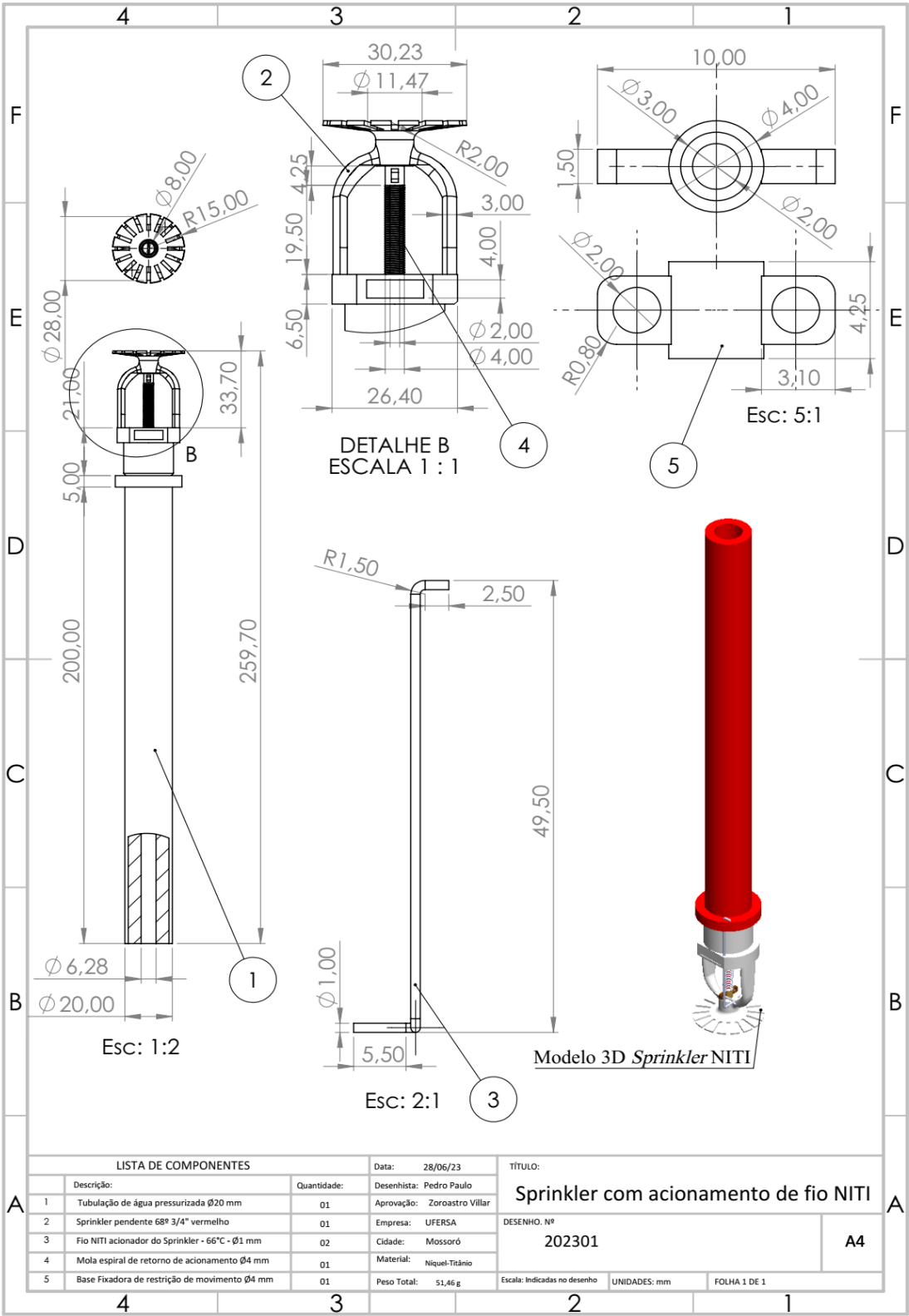


Figura A 1 – Modelagem de dispositivo *Sprinkler* acionado por fio NiTi. (Autoria própria,2023)

- PARÂMETROS DO FABRICANTE DO FIO (KEYUE Magnet & Materials)



O fio mágico japão importado da liga 0.6mm e do diâmetro de 1.0mm do nitinol do fio da memória macia de 1m all0y sma importou

R\$118,11 ~~R\$138,97~~ 15% desc.

2x R\$59,64 com juros Saiba Mais

R\$25,69 desc.
Cupom de Loja

cor: D1.0x1000mm

D0.6x1000mm

D1.0x1000mm

Descrições do produto

DESCRIÇÕES

Especificações:

Por favor, não hesite em entrar em contato conosco para obter preços de pedidos em grandes quantidades.
Tabela periódica (todos os elementos com cor azul podem ser fornecidos por nós)
Qualquer tamanho pode ser personalizado, por favor entre em contato conosco se você tiver alguma necessidade.

O fio é macio e amigável para ser feito a qualquer forma. Enquanto ao aquecê-lo, o fio girará para ser reto novamente. E a temperatura é de apenas 65 +/-5 graus celsius.

Detalhes

Uso	caseiro	Material	Aço de titânio
Cutomizado	Não	Número do modelo	TINI-Wire
Tipo	Outros	Origem	CN (Origem)
Wire Diameter	0.6mm 1.0mm	Length	1meter
Performance	Straight Super		

Figura A 2 – Informações do material junto ao fabricante. (Autoria própria,2022)

- GRÁFICOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS POR ENSAIO RET

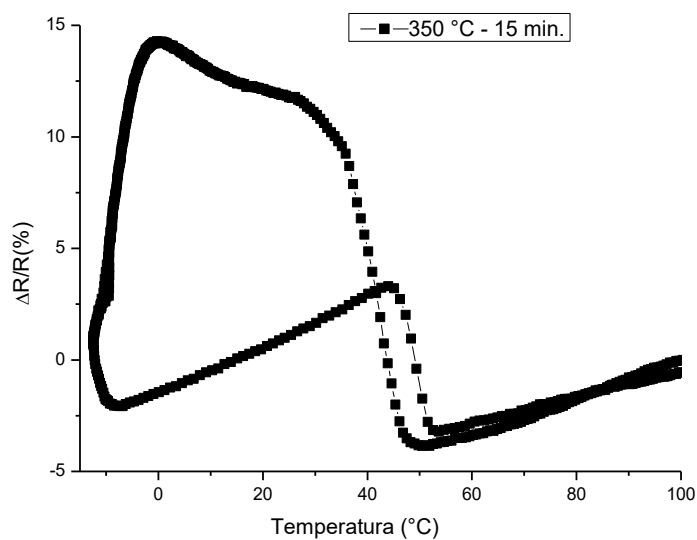


Figura A 3 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 350 °C com duração de 15 min.
(Autoria própria,2023)

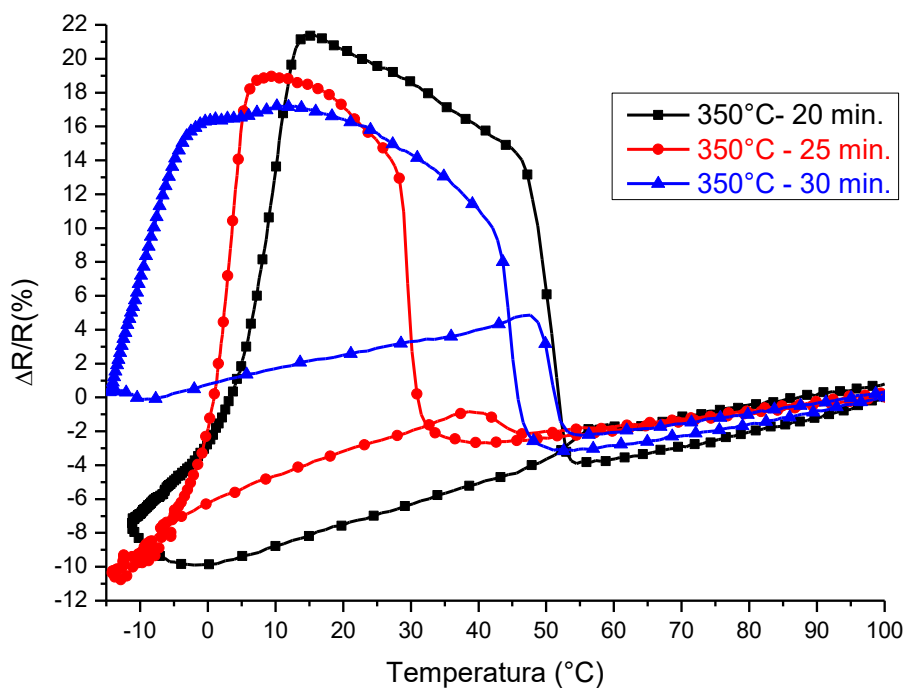


Figura A 4 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 350 °C com duração de 20, 25 e 30 min. (Autoria própria,2023)

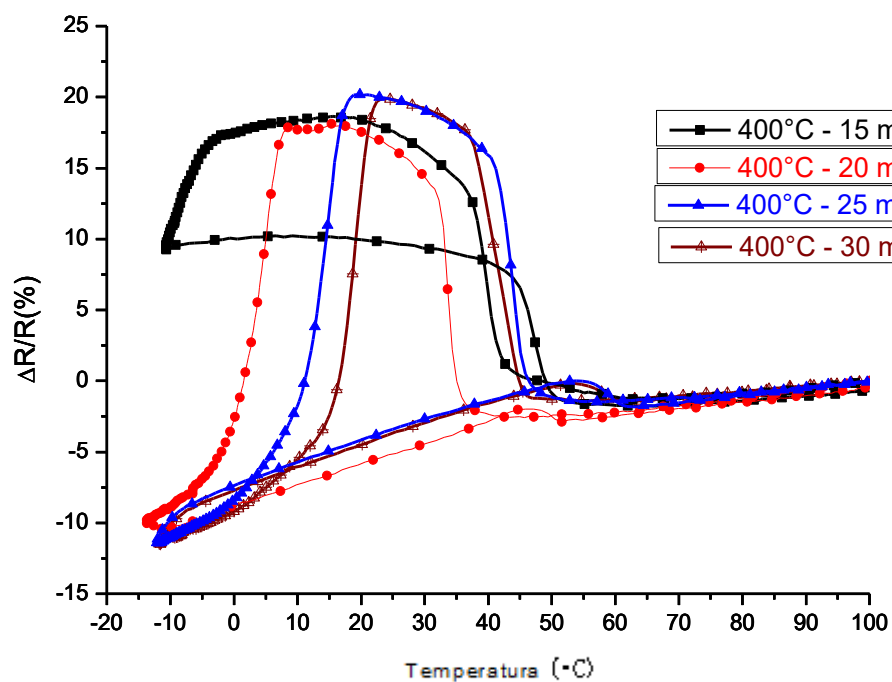


Figura A 5 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 400 °C com duração de 15, 20, 25 e 30 min. (Autoria própria,2023)

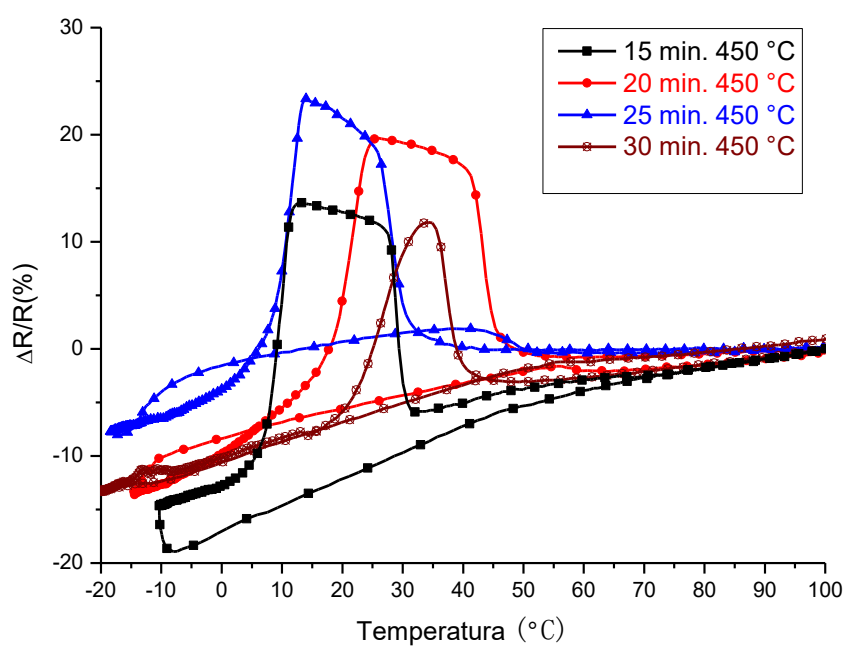


Figura A 6 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 450 °C com duração de 15, 20, 25 e 30 min. (Autoria própria,2023)

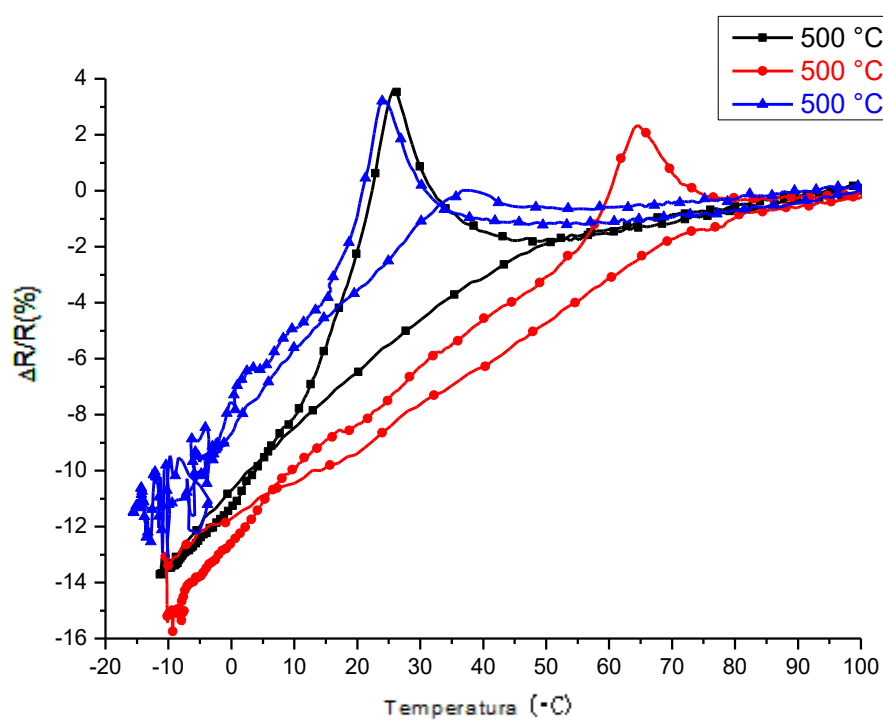


Figura A 7 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 500 °C com duração de 15, 20, 30 min. (Autoria própria, 2023)

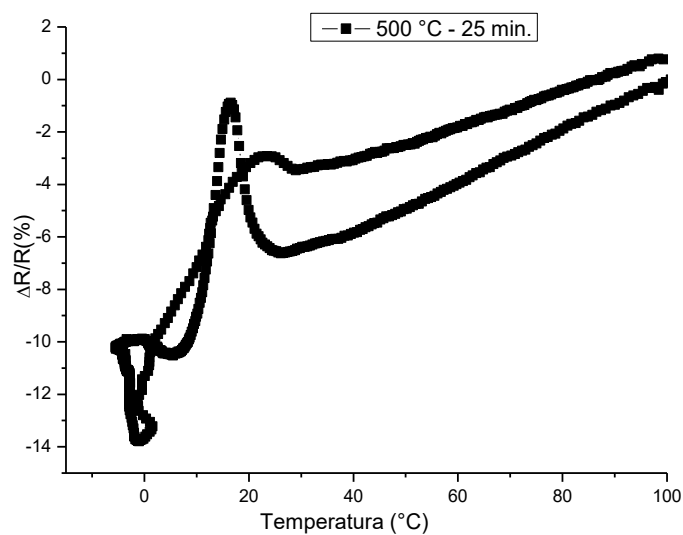


Figura A 8 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 500 °C com duração de 25 min. (Autoria própria, 2023)

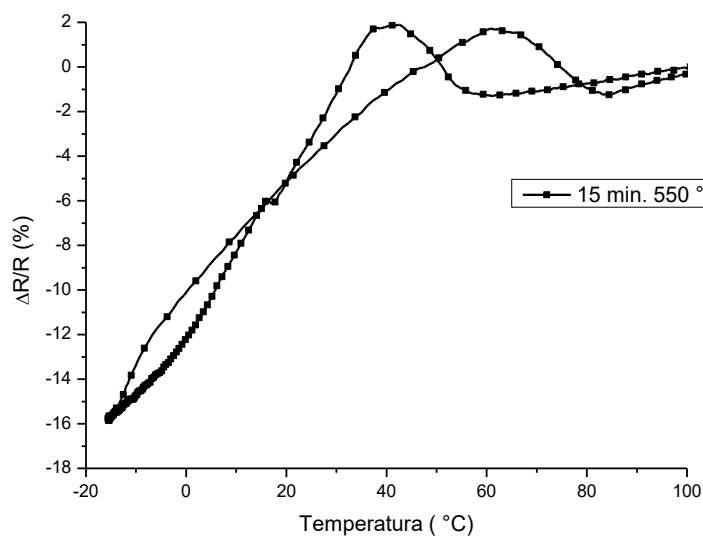


Figura A 9 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 550 °C com duração de 15 min.
(Autoria própria, 2023)

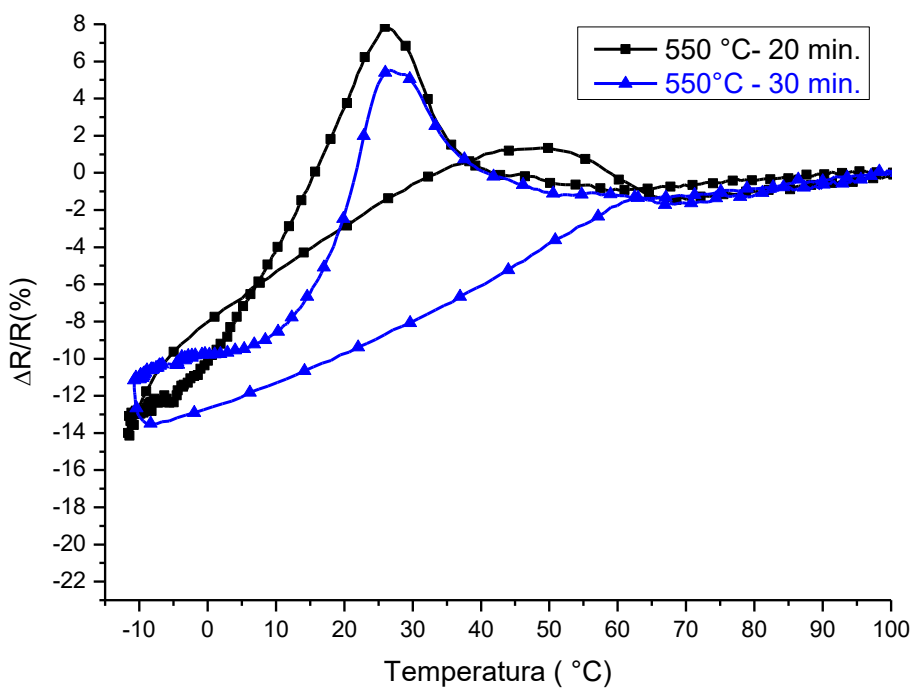


Figura A 10 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 550 °C com duração de 20 e 30 min. (Autoria própria, 2023)

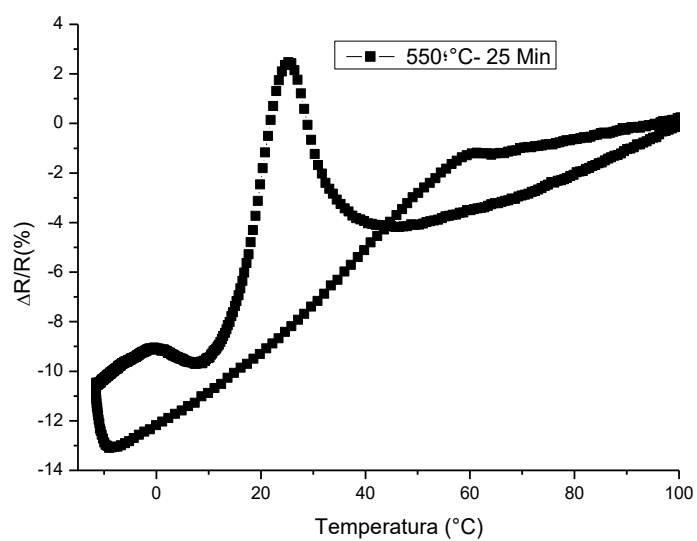


Figura A 11 – Gráfico RET de amostra tratada termicamente a 550 °C com duração de 25 min. (Autoria própria, 2023)