

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Cleiton do Espírito Santo Pereira

**Investigação de controles numéricos para aquecimento de
Liga com Memória de Forma por corrente elétrica**

Ilha Solteira, SP
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Investigação de Controles Numéricos para Aquecimento de Liga com Memória de Forma por Corrente Elétrica

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade
de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP - como
parte dos requisitos para obtenção do título de
de Engenheiro Mecânico.

Cleiton do Espírito Santo Pereira
Discente

Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani
Orientador

Me. Eduardo Preto
Co-Orientador

Ilha Solteira, SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436i Pereira, Cleiton do Espírito Santo.
Investigação de controles numéricos para aquecimento de liga com memória de forma por corrente elétrica / Cleiton do Espírito Santo Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
34 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Márcio Antônio Bazani
Co-orientador: Eduardo Preto
Inclui bibliografia

1. Liga com memória de forma. 2. Controlador liga-desliga. 3. Controlador PID. 4. Modelo constitutivo de Brinson.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9081
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" FACULDADE DE
ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Investigação de controles numéricos para aquecimento de liga com memória de forma por corrente elétrica

ALUNO: Cleiton do Espírito Santo Pereira RA: 182054421

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 9,0

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 MARCIO ANTONIO BAZANI
Data: 20/12/2024 08:03:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani

Documento assinado digitalmente
 EDUARDO PRETO
Data: 19/12/2024 21:24:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Eduardo Preto

Documento assinado digitalmente
 DIOGO CUNHA JOSE KARMOUCHE
Data: 19/12/2024 20:58:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Diogo Cunha José Karmouche

Documento assinado digitalmente
 CLEITON DO ESPIRITO SANTO PEREIRA
Data: 19/12/2024 20:42:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 19 de Dezembro de 2024.

Faculdade de Engenharia – FE/Unesp – Câmpus de Ilha Solteira

Cursos: Ciências Biológicas, Eng. Agrônoma, Eng. Civil, Eng. Elétrica, Eng. Mecânica, Física, Matemática e Zootecnia.
Avenida Brasil Centro, 56 – CEP 15385-000 – Ilha Solteira – São Paulo – Brasil
pabx +55 (18) 3743-1000 – fax +55 (18) 3742-2735 – scm.feis@Unesp.br – www.feis.Unesp.br

Agradecimentos

Agradeço aos meus professores Márcio Antônio Bazani e Eduardo Preto, que não mediram esforços para me orientar na elaboração deste trabalho. Agradeço também aos meus amigos Umberto Boranga e Arthur Chabole, que me proporcionaram tamanho companheirismo durante toda a minha graduação. À minha mãe Geraldina do Espírito Santo Pereira, pai Valmir Pereira Santos e irmã Taiane do Espírito Santo Pereira, agradeço por serem meus alicerces e por me ensinarem todos os dias a ser uma pessoa melhor, e que estiveram comigo tanto os momentos difíceis quanto nos momentos de vitórias e felicidades. À minha companheira de vida, Raylane Duarte, dedico um agradecimento especial por estar ao meu lado nos períodos mais difíceis dessa jornada e que sempre me mostrou como é ser uma pessoa boa com o próximo. Agradeço aos membros da banca examinadora pelas sugestões e comentários, que contribuíram para a melhoria deste trabalho. Por fim, agradeço a Deus pela oportunidade de viver esta jornada em uma cidade tão distante como Ilha Solteira, mas que me proporcionou inúmeros aprendizados, amizades valiosas e de desenvolvimento.

Resumo

As ligas com memória de forma (LMF) são materiais amplamente utilizados em diversas áreas, como engenharia, robótica e petroquímica, devido às suas propriedades únicas, tais como memória de forma e pseudoelasticidade. Diante desse cenário, este Trabalho de Graduação propõe o desenvolvimento e a análise comparativa de dois tipos de controladores: o controlador liga-desliga e o PID (Proporcional Integral Derivativo), para regular o aquecimento do fio de Nitinol. O controlador desenvolvido será integrado ao modelo constitutivo de Brinson para determinar a força gerada pelo material em resposta ao aquecimento. Posteriormente, essa força será aplicada em um sistema massa-mola-amortecedor para investigar a influência das propriedades da LMF no comportamento do sistema. O trabalho obteve sucesso ao evidenciar as vantagens do aquecimento controlado por PID em comparação com o aquecimento controlado pelo liga-desliga e o aquecimento sem controle. O maior destaque foi em relação ao menor tempo de resposta do controlador PID em relação às outras abordagens.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; Controlador liga-desliga, Controlador PID; Modelo constitutivo de Brinson.

Abstract

Shape memory alloys (LMF) are materials widely used in various areas, such as engineering, robotics and petrochemistry, due to their unique properties, such as shape memory and pseudoelasticity. Given this scenario, this Undergraduate Work proposes the development and comparative analysis of two types of controllers: the on-off controller and the PID (Proportional Integral Derivative), to regulate the heating of the Nitinol wire. The developed controller will be integrated with Brinson's constitutive model to determine the force generated by the material in response to heating. Subsequently, this force will be applied to a mass-spring-damper system to investigate the influence of LMF properties on the system's behavior. The work was successful in highlighting the advantages of PID-controlled heating compared to on-off controlled heating and uncontrolled heating. The biggest highlight was the shorter response time of the PID controller compared to other approaches.

Keywords: Shape Memory Alloys; On-Off Controller; PID Controller; Brinson Constitutive Model.

Lista de Figuras

1	Efeito memória de forma	13
2	Efeito memória de forma <i>Two way</i> na mola helicoidal	14
3	Efeito Pseudoelástico	14
4	Nasa cria pneu de Nitinol que nunca estoura	15
5	<i>Toe-Up</i> de Nitinol	16
6	Arco Niti Flexy Superelástico Redondo	17
7	Diagrama das tensões de transformações de austenita martensita dema- clada em função da temperatura.	20
8	Sensor de iluminação por presença	25
9	Controlador de temperatura para forno industrial	26
10	Fluxograma aquecimento LMF	27
11	Fluxograma sistema massa, mola e amortecedor	28
12	Aquecimento do fio de Nitinol sem e com controlador PID e <i>ON-OFF</i>	29
13	Sistema massa, mola e amortecedor.	30
14	Comportamento do sistema mecânico após atuação do fio de Nitinol com aquecimento sem controle.	31
15	Comportamento do sistema mecânico após atuação do fio de Nitinol com aquecimento controlado pelo liga-desliga.	31
16	Comportamento do sistema mecânico após atuação do fio de Nitinol com aquecimento controlado pelo PID.	32

Lista de Tabelas

1	Comparação entre controladores <i>ON-OFF</i> e PID	25
2	Parâmetros do material	29
3	Parâmetros do sistema	29
4	Propriedades do material do fio	30

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Objetivo geral	10
1.2	Objetivos específicos	10
2	Revisão Bibliográfica	11
2.1	Liga com memória de forma (LMF)	11
2.1.1	Origem das ligas com Memória de Forma (LMFs)	11
2.1.2	Propriedades da LMF	12
2.1.3	Efeito memória de forma	13
2.1.4	Efeito de pseudoelasticidade	14
2.1.5	Aplicações da Liga com memória de forma	15
2.1.6	Modelo de aquecimento	17
2.1.7	Modelo de Brinson	19
2.2	Controlador ON-OFF	21
2.3	Controlador PID	22
2.3.1	Componente proporcional (P)	22
2.3.2	Componente integral (I)	23
2.3.3	Componente derivativo (D)	23
2.3.4	Equação Geral do controlador PID	23
2.3.5	Calibração do controlador PID	24
2.4	Comparação entre controladores <i>ON-OFF</i> e PID	25
2.5	Aplicações e relevância dos controladores	25
3	Metodologia	27
3.1	Controle do aquecimento do Nitinol	27
3.2	Força gerada pelo fio de Nitinol	28
4	Resultados	29
5	Conclusão	33
	Referências	34

1 Introdução

Os controladores numéricos são fundamentais para garantir o funcionamento pré definido de um sistema, aumentando a eficiência e precisão em diversas aplicações. Para determinar o tipo de controle para o seu sistema, deve ser levado em consideração o seu objetivo. De acordo com Ogata (2011), se a prioridade é um bom custo-benefício em conjunto com um princípio de funcionamento simples, o controlador *ON-OFF* é o mais recomendado. Porém, Quando há a necessidade de um controlador versátil e que funcione de forma contínua e ajustável, o controlador PID (proporcional, integral e derivativo) apresenta maior destaque quando comparado ao *ON-OFF*.

Este trabalho será dividido em 5 seções. A seção 1 irá apresentar os objetivos e motivações do trabalho. A seção 2 disponibilizará uma revisão bibliográfica sobre as ligas com memória de forma, ressaltando modelagens e aplicações. Ainda nessa seção, será realizada uma abordagem sobre os controladores *ON-OFF* e PID. A seção 3 é responsável por mostrar o princípio de funcionamento do algoritmo em Python desenvolvido para construção das análises deste trabalho. A seção 4 mostrará os resultados e discussões sobre integração do controle numérico no fio de Nitinol. Por fim, a seção 5 será responsável por disponibilizar a conclusão sobre todo o conteúdo do trabalho.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar o controle numérico do fio de liga com memória de forma. A principal motivação é obter uma análise detalhada sobre o comportamento do fio de Nitinol ao introduzi-lo em cenários como: aquecimento numérico controlado e atuação em um sistema massa, mola e amortecedor.

1.2 Objetivos específicos

- Construção do modelo numérico do aquecimento da liga com memória de forma.
- Construção e aplicação numérica dos controles *ON-OFF* e PID no modelo de aquecimento da liga com memória de forma.
- Obtenção das forças do fio de Nitinol a partir da construção e aplicação do modelo numérico de Brinson.
- Aplicação da força em um sistema massa-mola-amortecedor.
- Análise do desempenho da liga nas situações impostas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Liga com memória de forma (LMF)

O descobrimento e utilização cada vez mais constante dos metais contribui significativamente para o desenvolvimento da humanidade, pois possibilitou a criação de ferramentas indispensáveis para atividades rotineiras na vida do homem. Além disso, abriu caminho para a fabricação de armas utilizadas na proteção de territórios em períodos de conflitos. Os primeiros metais explorados eram aqueles com ponto de fusão mais baixo, como o cobre, o bronze e o estanho, que acabaram por nomear importantes eras históricas (Navarro, 2006).

Com o avanço do conhecimento e da tecnologia, o processo de produção de metais evoluiu significativamente. Descobertas científicas, como o entendimento das microestruturas e de seus efeitos nas propriedades dos materiais, permitiram a criação de novas técnicas de fabricação. Isso resultou em ligas e compósitos com características específicas, que atualmente são amplamente utilizados em diferentes setores (Boyd; Lagoudas, 1996).

O progresso tecnológico também trouxe a necessidade de desenvolver materiais mais leves, resistentes e versáteis, capazes de atender a demandas específicas, como sensoria-mento, proteção contra interferências eletromagnéticas e outras funções avançadas. Dessa evolução surgiram os chamados materiais multifuncionais, que desempenham diversas funções em um único sistema (Boyd; Lagoudas, 1996).

Entre os materiais multifuncionais, destacam-se os chamados materiais inteligentes, que possuem a habilidade de reagir a estímulos externos de forma controlada. Um exemplo notável são as ligas com memória de forma (LMFs), que podem mudar sua rigidez, dissipar energia ou alterar suas dimensões ao serem aquecidas. Esses materiais também podem funcionar como sensores, convertendo estímulos mecânicos, como vibrações, em saídas não mecânicas, como a geração de corrente elétrica, caso dos materiais piezoelétricos (Boyd; Lagoudas, 1996).

2.1.1 Origem das ligas com Memória de Forma (LMFs)

A trajetória das LMFs começou em 1890, quando Adolf Martens identificou a estrutura martensítica em aços, o que deu início a uma série de estudos na área de metalurgia. Inicialmente, essa transformação foi observada apenas em ligas ferro-carbono (Fe-C). Em 1949, porém, os cientistas Kurdjumov e Khandros notaram o mesmo fenômeno em ligas de cobre e zinco (CuZn) e de cobre e alumínio (CuAl), percebendo que o processo era reversível e o denominando de transformação martensítica termoelástica (Boyd; Lagoudas, 1996).

Esse campo de pesquisa permaneceu em relativa estagnação até 1962, quando William Buehler descobriu a liga de níquel e titânio (NiTi) durante estudos para desenvolver

materiais resistentes ao calor. Essa liga, posteriormente chamada de Nitinol, destacou-se por suas excelentes propriedades mecânicas e pela capacidade de retornar à sua forma original após deformação. Foi essa característica que introduziu o conceito de “efeito de memória de forma”. O nome Nitinol é uma homenagem ao *Naval Ordnance Laboratory*, onde foi desenvolvida (Silva, 2017). A descoberta impulsionou novas investigações científicas sobre os efeitos térmicos e suas possíveis aplicações práticas (Boyd; Lagoudas, 1996).

De acordo com Alves et al. (2018), a composição das ligas de Nitinol é balanceada, com cerca de 50% de níquel e 50% de titânio, garantindo estabilidade estrutural. No entanto, elementos como cobre, ferro, cobalto e cromo podem ser adicionados para ajustar propriedades específicas. Essa composição, aliada a processos de fabricação avançados, confere ao Nitinol características notáveis, como alta resistência à corrosão, estabilidade térmica, grande capacidade de recuperação de forma e excelente biocompatibilidade.

O uso comercial do Nitinol ganhou destaque na década de 1990, especialmente em dispositivos médicos, como stents. Posteriormente, na década de 2000, suas aplicações foram ampliadas para a indústria aeroespacial e petrolífera. Antes disso, o material já era empregado em produtos como válvulas, conectores elétricos e sistemas de ar condicionado (Boyd; Lagoudas, 1996).

2.1.2 Propriedades da LMF

As ligas de memória de forma (LMFs) são materiais avançados que combinam características mecânicas e funcionais únicas, tornando-as atrativas para uma ampla gama de aplicações tecnológicas e industriais. Esses materiais se destacam principalmente pela alta densidade de energia, permitindo que realizem trabalho significativo em um volume reduzido (Piccirillo et al., 2018). Essa característica é especialmente vantajosa em aplicações onde o espaço é limitado, como dispositivos médicos, microrrobótica e atuadores em sistemas de engenharia. Por outro lado, apresentam uma limitação na faixa de frequência de atuação devido à dependência de troca térmica para suas transformações de fase. Essa dependência implica que a eficiência das LMFs está diretamente relacionada à capacidade de controlar a temperatura de operação, seja por condução térmica, convecção ou sistemas de resfriamento otimizados, o que exige cuidados especiais em seu projeto e implementação (Boyd; Lagoudas, 1996).

As propriedades funcionais principais das LMFs incluem o efeito de memória de forma e a pseudoelasticidade, comportamentos que as diferenciam de materiais tradicionais. Essas propriedades estão diretamente associadas à transformação de fase entre as estruturas cristalinas austenítica e martensítica. A transição entre essas fases ocorre sob variações de temperatura ou tensão mecânica, tornando esses materiais extremamente versáteis em sistemas que requerem resposta ativa a mudanças no ambiente (Boyd; Lagoudas, 1996). Especificamente, as LMFs são capazes de sofrer grandes deformações reversíveis, permi-

tindo que retornem à sua forma original após a remoção da tensão ou a modificação da temperatura. Esse comportamento é um diferencial significativo, sendo amplamente explorado em aplicações como atuadores para dispositivos biomédicos, sistemas de controle de vibração e mecanismos de absorção de impacto (Preto, 2022).

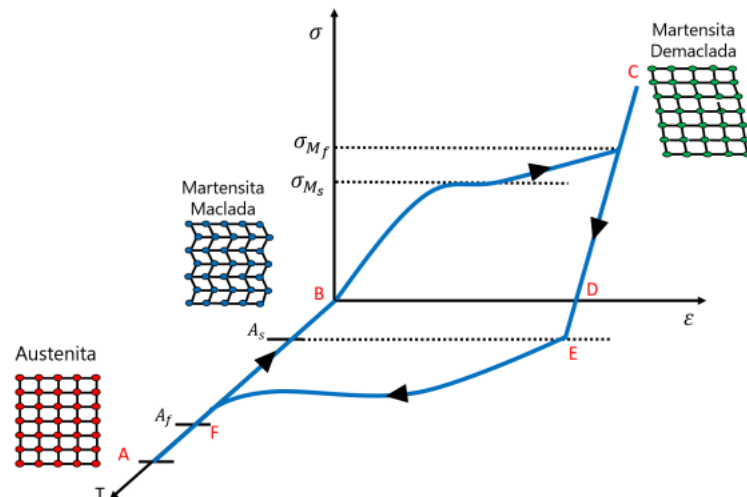
2.1.3 Efeito memória de forma

O Efeito Memória de Forma (EMF) é uma das características mais marcantes das LMFs, possibilitando que esses materiais “lembrem” uma forma original e retornem a ela após a aplicação de estímulos específicos. Esse fenômeno pode ser classificado em dois tipos principais: *One Way* e *Two Way* (Adeodato, 2014; Silva, 2017). Ambos os tipos envolvem transformações cristalinas entre as fases martensítica e austenítica, mas possuem comportamentos e aplicações distintas.

O efeito *One Way* ocorre ao impor no material uma temperatura acima de A_f (temperatura final da transformação Austenita). Conforme a figura 1, ao diminuir a temperatura do material do ponto A até o ponto B, abaixo de M_f (Temperatura final da transformação martensita), ocorre a transformação de austenita em martensita maclada.

Ao aplicar tensão, entre o ponto B e a tensão de início de formação de martensita não maclada (σ_{M_s}) ocorrerá deformação linear (Alves et al., 2018). Após σ_{M_s} , as variantes da martensita se reorganizam causando grandes deformações. Ao exceder σ_{M_f} (tensão final da formação de martensita não maclada), a martensita maclada transforma-se em não maclada. Ao remover a tensão, o material tenta retornar elasticamente à sua forma original, porém essa ação acaba gerando uma deformação residual. Após novo resfriamento abaixo de M_f , a martensita não maclada se transforma em maclada, sem deformações significativas (Alves et al., 2018).

Figura 1 – Efeito memória de forma

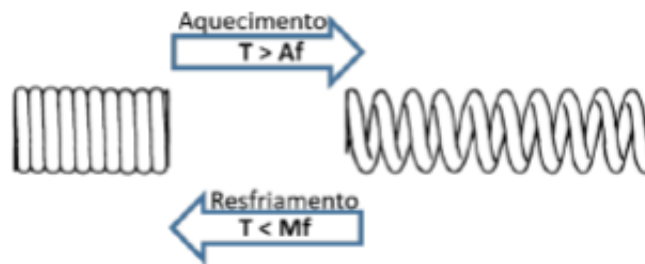


Fonte: (Preto et al., 2023)

O efeito memória de forma *Two way* é conhecido pela capacidade do material de memorizar duas formas diferentes sob a variação da temperatura: A primeira forma é associada à estrutura austenítica e outra à martensítica (Silva, 2017). Ao comparar com o tipo *One Way*, a liga *Two Way* possui menor capacidade de suportar tensão (Adeodato, 2014) e são muito utilizadas sem aplicação de tensões (Silva, 2017).

Conforme ilustrado na Figura 2, para temperaturas acima de A_f , a mola apresenta um passo específico, enquanto ao resfriar até M_f , o passo se reduz (Preto et al., 2023).

Figura 2 – Efeito memória de forma *Two way* na mola helicoidal

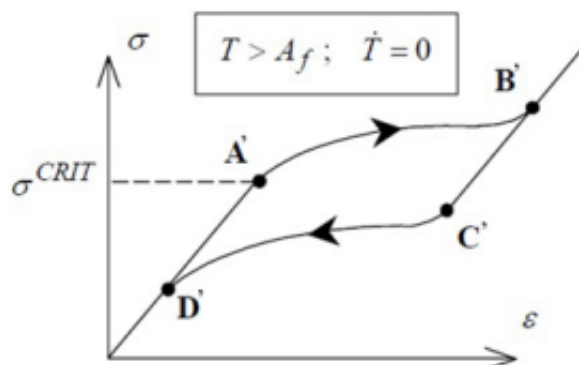


Fonte: (Silva, 2017)

2.1.4 Efeito de pseudoelasticidade

O efeito de pseudoelasticidade é outra propriedade essencial das LMFs e ocorre exclusivamente em temperaturas acima da temperatura de transformação martensítica, onde a fase austenítica predomina. Conforme a figura 3, quando submetido a uma tensão mecânica, o material sofre uma transformação da fase austenítica para a martensítica induzida por tensão, acompanhada de uma alta deformação a tensão constante (Adeodato, 2014). Esse fenômeno é único porque permite que as LMFs suportem deformações significativamente maiores do que os materiais convencionais sem comprometer sua integridade estrutural. A pseudoelasticidade também oferece uma resposta rápida, tornando-a ideal para aplicações em dispositivos onde a velocidade de atuação é crítica (Alves et al., 2018).

Figura 3 – Efeito Pseudoelastico



Fonte: (Paiva, 2004)

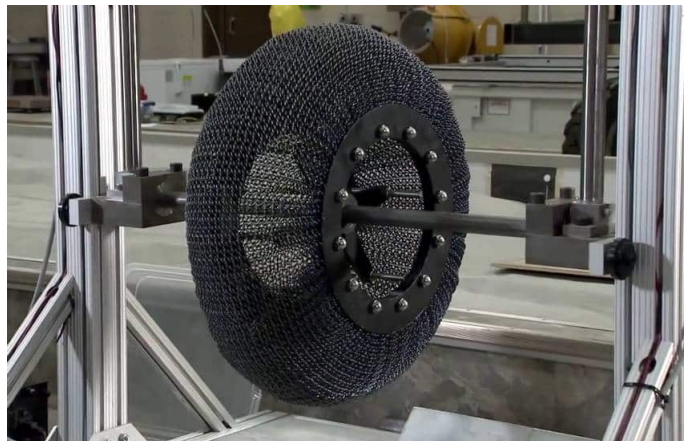
Durante o processo de descarregamento, o material retorna à sua fase austenítica original, recuperando sua forma inicial sem a necessidade de reaquecimento. Esse comportamento é particularmente vantajoso em aplicações dinâmicas, como sistemas de absorção de impacto em veículos, implantes biomédicos ajustáveis e mecanismos de controle ativo de vibração. Além disso, as LMFs exibem uma elevada eficiência no armazenamento e liberação de energia mecânica, superando muitos materiais tradicionais em desempenho funcional. A capacidade de combinar flexibilidade, resistência e reversibilidade torna o efeito pseudoelástico um diferencial para o uso das LMFs em tecnologias de alto desempenho (Preto et al., 2023).

2.1.5 Aplicações da Liga com memória de forma

As ligas com memória de forma (LMFs) encontraram muitas aplicações devido às suas propriedades únicas, como efeito de memória de forma e pseudoelasticidade. Entre os setores que mais se beneficiam com essas tendências estão aeroespacial, medicina, odontologia, aviação e petroquímica. Muitos desses materiais podem ser utilizados em projetos que exigem alto desempenho, adaptabilidade e durabilidade, abrindo novas oportunidades tecnológicas em diversos campos.

Uma das principais motivações para a utilização do LMF no setor é a necessidade de materiais adaptáveis para aplicação em missões espaciais, como as sondas enviadas a Marte (Figura 4). Nestas condições, os materiais existentes, como a liga de alumínio, têm uma vida útil limitada, o que pode comprometer o sucesso da missão. Para resolver esses problemas, foram desenvolvidos novos pneus que utilizam molas de nitinol. Devido à natureza destas ligas, estes pneus podem suportar deformações temporárias e retornar à sua forma original quando atingem um obstáculo. Esta inovação não aumentou a longevidade dos instrumentos, mas sim reduziu os custos e problemas associados às missões espaciais.

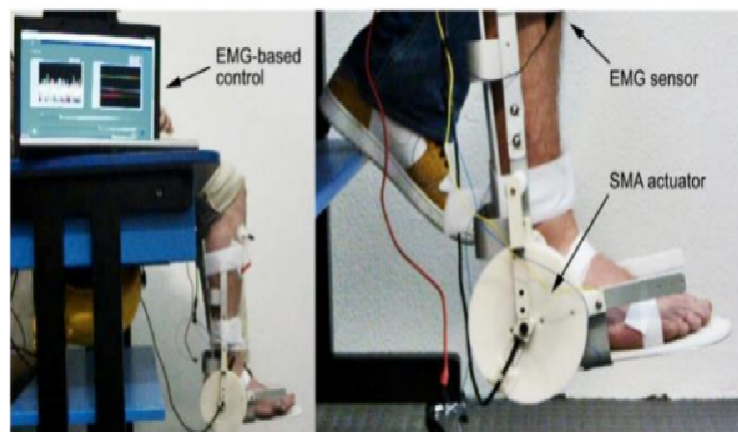
Figura 4 – Nasa cria pneu de Nitinol que nunca estoura



Fonte:(Waldrop, 1990).

O Nitinol é amplamente utilizado em dispositivos médicos e terapêuticos. Um exemplo popular é o *Toe-up* (Figura 5), uma ferramenta inovadora para pacientes com paresia nos membros inferiores. Essa ferramenta utiliza fios de nitinol que promovem movimentos controlados em diferentes direções, como para cima, para baixo, para a esquerda, para a direita durante o aquecimento ou resfriamento. O aparelho funciona em conjunto com a eletromiografia para captar sinais musculares e avaliar o potencial de recuperação motora do paciente. Esta tecnologia representa um grande avanço no campo da reabilitação, pois proporciona uma forma personalizada e eficaz de melhorar a função motora e a qualidade de vida dos pacientes. Além disso, os LMFs são usados em stents vasculares, que são dispositivos que utilizam expansão dose-controlada para expandir artérias bloqueadas.

Figura 5 – *Toe-Up* de Nitinol



Fonte: (Pittaccio et al., 2015).

Na odontologia, os fios ortodônticos superelásticos de nitinol (Figura 6) são amplamente utilizados por serem superiores aos materiais convencionais. Esses fios são mais flexíveis, têm menos atrito e permitem melhor controle da movimentação dentária. Esses elementos não apenas melhoram os resultados clínicos, mas também melhoram o conforto do paciente durante o tratamento do paciente. Os cabos NiTi são importantes para uma recuperação mais rápida e eficiente, reduzindo a necessidade de trocas frequentes.

No setor aeronáutico, a Boeing lidera o desenvolvimento de infraestrutura adaptativa utilizando tecnologia LMF. Novos recursos incluem entradas de motor variáveis, pás de rotor ajustáveis e divisas geométricas ajustáveis. Estas tecnologias visam tornar as aeronaves mais estáveis e silenciosas, reduzindo o ruído e aumentando a eficiência do motor. O LMF também está sendo explorado em asas adaptativas e sistemas de controle aerodinâmico para maior desempenho e facilidade de controle. A Boeing continua investindo em pesquisas para expandir o uso comercial do LMF e integrar essas soluções nas aeronaves (Calkins; Mabe; Ruggeri, 2008).

Outra importante área de aplicação é o setor petroquímico, especialmente conexões de tubos e mangueiras. O LMF tem muitas vantagens neste contexto, incluindo a redução

Figura 6 – Arco Niti Flexy Superelástico Redondo



Fonte:(Geroldo, 2009).

dos custos de manutenção e montagem ao criar uma conexão selada que é resistente a alterações térmicas e mecânicas. Além disso, a sua extrema durabilidade e resistência a ambientes agressivos tornam-no ideal para instalações marítimas e locais remotos onde a fiabilidade é necessária. (Preto, 2022) O LMF continua a ser uma área de desenvolvimento ativa, com novas aplicações aparecendo o tempo todo. Estas ligas têm o potencial de revolucionar todas as indústrias e se tornarem uma das tecnologias mais influentes do século XXI.

2.1.6 Modelo de aquecimento

A variação de temperatura em um fio de liga com memória de forma (LMF) é controlada pelo chamado efeito Joule. Para descrever matematicamente essa relação entre a corrente elétrica aplicada e a variação de temperatura, utiliza-se um modelo que conecta o aquecimento elétrico ao processo de transferência de calor. Esse modelo é representado pela equação 1 (Leo, 2007):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_c A_c}{A \rho c_p} (T_\infty - T) + \frac{R}{A \rho c_p I^2} \quad (1)$$

Onde ρ representa a densidade do material da LMF, A é a área da seção transversal do fio ($A = \frac{\pi d^2}{4}$, onde d é o diâmetro do fio), c_p é o calor específico do material, R é a resistência elétrica por unidade de comprimento, h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, e A_c é a área de troca de calor por unidade de comprimento. A temperatura ambiente é representada por T_∞ e I corresponde à corrente elétrica aplicada.

A resistência elétrica do fio LMF segue o mesmo princípio aplicado a condutores elétricos convencionais, descrito pela equação 2,

$$R_{eq} = \rho_{el} \frac{L}{A} \quad (2)$$

Na equação 2, R_{eq} é a resistência elétrica total, ρ_{el} é a resistividade elétrica do material ($\Omega \cdot m$), A é a área da seção transversal e L é o comprimento do fio. A resistência por unidade de comprimento (R) pode ser obtida pela expressão apresentada pela equação 3:

$$R = \frac{\rho_{el}}{A} \quad (3)$$

Estudos realizados por Gil and Planell (1998) mostram que as propriedades físicas das LMFs, como calor específico e resistividade elétrica, variam conforme a estrutura cristalina do material. Para descrever essas mudanças, utilizam-se modelos baseados na fração martensítica (ξ), que indica se o material está na fase austenita ($\xi = 0$), na fase martensita ($\xi = 1$) ou em um estado intermediário ($0 < \xi < 1$).

No caso da resistividade elétrica, Garner et al. (2000), Elahinia and Ashrafiuon (2002) propuseram a seguinte fórmula (Equação 4):

$$\rho_{el} = \rho_{elA} + \xi(\rho_{elM} - \rho_{elA}) \quad (4)$$

Neste caso, ρ_{el} é a resistividade total, enquanto ρ_{elA} e ρ_{elM} representam as resistividades nas fases austenita e martensita, respectivamente.

Para o calor específico (c_p), Ikuta (1990), Liu, Huang and Yen (2009) propuseram modelos que levam em conta diferenças entre as fases. Com base nesses trabalhos, foi possível escrever a equação 5:

$$c_p = c_{pA} + \xi(c_{pM} - c_{pA}) \quad (5)$$

Nessa fórmula, c_{pA} e c_{pM} são os valores de calor específico nas fases austenita e martensita, respectivamente.

Por fim, o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) depende da diferença de temperatura entre o material e o fluido ao redor, além da geometria do fio. Uma estimativa para esse coeficiente é dada por Holman and Valenzuela (1998), representada pela equação 6:

$$h_c = 1,32 \left(\frac{T - T_\infty}{d} \right)^{1/4} \quad (6)$$

Onde, d é o diâmetro do fio e T é a temperatura do fio.

2.1.7 Modelo de Brinson

O modelo de Brinson (1993) é uma solução unidimensional para descrever o comportamento termoelástico das ligas com memória de forma. Ele une conceitos de transformação martensítica desencadeada por temperatura e por tensão, o que permite analisar fenômenos como pseudoelasticidade e memória de forma em um único framework matemático.

Disponibilizado pela equação 7, este modelo divide o volume de martensita em duas partes: uma devido à temperatura (ξ_T) e outra ao estresse (ξ_S), permitindo descrever de forma eficaz os comportamentos de memória de forma e pseudoelasticidade:

$$\xi = \xi_S + \xi_T \quad (7)$$

Caso as mudanças de temperatura sejam negligenciadas, utiliza-se a equação 8:

$$\sigma = E(T, \sigma)(\epsilon - \epsilon_R \xi_S) \quad (8)$$

Nesta equação, σ é a tensão, ϵ é a deformação atual, E é o módulo de elasticidade, ϵ_R representa a deformação residual, enquanto ξ_S e ξ_T são as frações volumétricas de martensita devidas à tensão e à temperatura, respectivamente. Quando a temperatura excede A_s , ξ_T é considerado insignificante, restando apenas $\xi = \xi_S$, pois a temperatura não contribui para a formação de martensita maclada (Enemark, 2015). De acordo com a equação 9, o módulo de elasticidade pode ser obtido através da relação linear entre os módulos de elasticidade na fase austenita (E_A) e martensita (E_M):

$$E(T, \sigma) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad (9)$$

A deformação atual é descrita pela equação 10, na qual relaciona as equações 9 e 8:

$$\epsilon(T, \sigma) = \frac{\sigma}{E(T, \sigma)} + \epsilon_R(\xi) \quad (10)$$

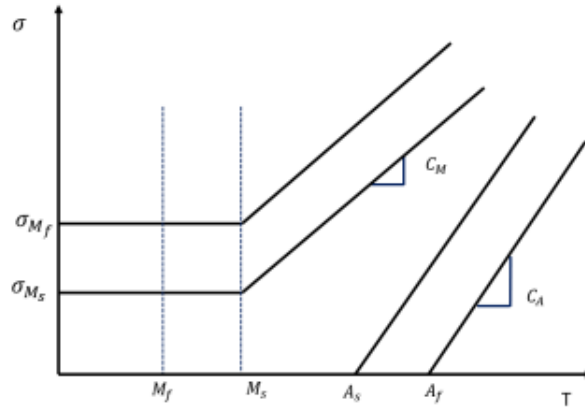
A variação da deformação em relação a tensão (ϵ'_σ) e temperatura (ϵ'_T) são calculadas e apresentadas nas equações 11 e 12 respectivamente (Preto, 2022):

$$\epsilon'_\sigma = \frac{1}{E} - \frac{\sigma(E_M - E_A)}{E^2} \xi'_\sigma + \epsilon_R \xi'_\sigma \quad (11)$$

$$\epsilon'_T = -\frac{\sigma(E_M - E_A)}{E^2} \xi'_T + \epsilon_R \xi'_T \quad (12)$$

Analisando a figura 7, para temperaturas abaixo da temperatura de início da transformação martensita (M_s), as tensões críticas de início (σ_s^{cr}) e fim da formação martensita maclada (σ_f^{cr}) permanecem constante. Já para temperaturas acima de M_s , o comportamento linear da fração cúbica permite determinar os parâmetros C_M e C_A (Coura, 2016):

Figura 7 – Diagrama das tensões de transformações de austenita martensita demaclada em função da temperatura.



Fonte:(Preto, 2022).

$$C_M(T - M_s) \leq \sigma \leq C_M(T - M_f) \quad (13)$$

Para a transformação inversa:

$$T \geq A_s; \quad C_A(T - A_f) \leq \sigma \leq C_A(T - A_s) \quad (14)$$

Nas equações 13 e 14, C_M e C_A representam respectivamente o coeficiente de influência de tensão martensita e austenita.

No efeito pseudoelástico, uma carga aplicada em temperaturas acima de A_f (temperatura de fim da transformação austenita) induz a formação de martensita, que retorna ao estado original ao remover a carga, fechando um ciclo histerético (Alves et al., 2018).

Brinson (1993) propôs modelar a função de rigidez com uma curva baseada na função cosseno (Equação 15):

$$h_B(k) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(\pi k) \quad (15)$$

Onde k representa a transformação direta (Austenita para Martensita) ou inversa (Martensita para Austenita).

Posteriormente, foi apresentada uma alternativa para aumentar a suavidade e o controle da função de rigidez por meio de curvas de Bézier cúbica:

$$h(t) = (1-t)^3 p_1 + 3t(1-t)^2 p_2 + 3t^2(1-t) p_3 + t^3 p_4, \quad t \in [0, 1] \quad (16)$$

Os parâmetros definidos para as transformações direta e inversa são $p_1 = (0, 0)$, $p_2 = (k, n_a)$, $p_3 = (1-k, 1-n_b)$ e $p_4 = (1, 1)$, com $k \ll 1$. A função de rigidez pode ser expressa para a transformação direta (Equação 17) e para a transformação inversa (Equação 18):

$$h_f = (3n_a + 3n_b - 2)t^3 + 3(1 - 2n_a - n_b)t^2 + 3n_a t \quad (17)$$

$$h_r = -2(1 - 3k)t^3 + 3(1 - 3k)t^2 + 3kt \quad (18)$$

A substituição das funções no modelo revelou que as curvas de Bézier oferecem maior precisão e flexibilidade em comparação às funções cossenoidais de Brinson (1993), resultando em um ajuste mais sutil ao comportamento da martensita (Alves et al., 2018).

2.2 Controlador ON-OFF

O controlador *ON-OFF* é o tipo mais simples de controlador automático, sendo amplamente utilizado em sistemas que requerem ajustes binários, ou seja, onde o controle é ativado ou desativado. O princípio de funcionamento do controlador *ON-OFF* é direto: ele compara a variável do processo com o *setpoint* e atua de forma abrupta, ligando ou desligando o atuador, dependendo da diferença entre os dois. Um exemplo clássico de aplicação desse tipo de controlador é o termostato doméstico, que liga ou desliga um sistema de aquecimento ou resfriamento para manter uma temperatura desejada (Farrenkopf; Sabroff; Wheeler, 1964)

A lógica de operação de um controlador *ON-OFF* pode ser descrita como segue:

- Se a variável do processo estiver abaixo do *setpoint*, o controlador liga o atuador.
- Se a variável do processo estiver acima do *setpoint*, o controlador desliga o atuador.

Matematicamente, o comportamento do controlador *ON-OFF* pode ser expresso pela seguinte equação:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } e(t) > 0 \\ 0, & \text{se } e(t) \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

De acordo com Farrenkopf, Sabroff and Wheeler (1964), para evitar oscilações rápidas e instabilidades, os controladores *ON-OFF* geralmente incluem uma **histerese** no ponto de comutação, criando uma pequena faixa ao redor do *setpoint* dentro da qual o sistema permanece estável antes de alternar entre os estados *ON* e *OFF*. Essa abordagem reduz o desgaste mecânico em componentes, como relés e válvulas, e melhora a confiabilidade do sistema.

Embora o controlador *ON-OFF* seja eficaz para sistemas simples e de baixa inércia, ele apresenta limitações significativas em aplicações que exigem maior precisão. Como o controle é binário, ele não é capaz de fornecer ajustes graduais ou contínuos, resultando em flutuações ao redor do *setpoint*. Além disso, sistemas com alta inércia podem sofrer de *overshoot* significativo, ou seja, a variável do processo pode ultrapassar consideravelmente o valor desejado antes de estabilizar.

2.3 Controlador PID

O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é um dos controladores mais amplamente utilizados no campo da automação e controle de processos. Sua popularidade deve-se à capacidade de fornecer ajustes contínuos e precisos, minimizando desvios e estabilizando sistemas de forma eficiente. O PID combina três ações de controle distintas: proporcional, integral e derivativa, que, juntas, permitem lidar com uma ampla gama de desafios em sistemas dinâmicos. (Patel, 2020)

2.3.1 Componente proporcional (P)

O termo proporcional ajusta a saída do controlador com base na magnitude do erro atual, que é a diferença entre o *setpoint* e a variável do processo. Em termos matemáticos, é expresso como:

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (20)$$

Onde:

- K_p : Ganho proporcional.
- $e(t)$: Erro no instante de tempo t .

O controle proporcional reduz rapidamente o erro, mas não consegue eliminá-lo completamente, pois tende a deixar um pequeno **erro permanente** (*offset*) em sistemas que dependem exclusivamente deste componente.

2.3.2 Componente integral (I)

O termo integral elimina o erro permanente acumulando o erro ao longo do tempo e ajustando a saída com base nesse acúmulo. Sua equação é:

$$I = K_i \int e(t) dt \quad (21)$$

Onde:

- K_i : Ganho integral.

Esse componente é particularmente útil em sistemas onde a precisão é crítica, pois assegura que o *setpoint* seja alcançado com o tempo. Contudo, seu uso excessivo pode causar instabilidades, como oscilações e *overshoot*.

2.3.3 Componente derivativo (D)

O termo derivativo prevê mudanças futuras no erro ao calcular a taxa de variação do erro em relação ao tempo. Sua fórmula é:

$$D = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (22)$$

Onde:

- K_d : Ganho derivativo.

Esse componente fornece uma ação de amortecimento que reduz oscilações e melhora a estabilidade do sistema, especialmente em processos dinâmicos e de alta inércia.

2.3.4 Equação Geral do controlador PID

De acordo com Pereira, Amaral and Garbi (2012), o controlador PID combina essas três ações em uma única equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

Onde $u(t)$ é a saída do controlador. A sintonização dos ganhos K_p , K_i e K_d é um aspecto crítico do projeto, pois define o desempenho do sistema de controle.

2.3.5 Calibração do controlador PID

A calibração de um controlador PID é essencial para otimizar seu desempenho em uma aplicação específica. Existem várias abordagens para sintonizar os ganhos K_p , K_i e K_d , sendo a **calibração de Ziegler-Nichols** uma das mais conhecidas e amplamente utilizadas. (Patel, 2020)

O método de Ziegler-Nichols é baseado na observação do comportamento do sistema em malha fechada. Ele envolve os seguintes passos:

1. Configure o controlador para o modo proporcional, com $K_i = 0$ e $K_d = 0$.
2. Aumente gradualmente o ganho proporcional K_p até que o sistema comece a oscilar de forma sustentada, sem divergência ou amortecimento. Esse valor de K_p é chamado de *ganho crítico* (K_u).
3. Meça o período das oscilações sustentadas, chamado de *período crítico* (T_u).

Com os valores de K_u e T_u , os parâmetros do controlador PID são calculados utilizando tabelas padronizadas. Por exemplo, para um controlador PID padrão, os ganhos são definidos como:

$$K_p = 0.6 \cdot K_u \tag{24}$$

$$K_i = \frac{2 \cdot K_p}{T_u} \tag{25}$$

$$K_d = \frac{K_p \cdot T_u}{8} \tag{26}$$

Esse método oferece uma sintonização inicial eficaz, mas ajustes finos podem ser necessários para atender às especificidades do sistema. Além de Ziegler-Nichols, outras técnicas de calibração incluem tentativas e erros, métodos analíticos e heurísticos, dependendo da complexidade e dos requisitos do sistema. (Patel, 2020)

2.4 Comparação entre controladores *ON-OFF* e PID

Para fins didáticos, a tabela a seguir oferece um breve comparativo entre os controladores discutidos:

Tabela 1 – Comparação entre controladores *ON-OFF* e PID

Característica	Controlador <i>ON-OFF</i>	Controlador PID
Complexidade	Baixa	Alta
Tipo de Resposta	Binária	Contínua
Precisão	Baixa	Alta
Oscilações	Frequentes sem histerese	Controladas com ação derivativa
Tempo de Resposta	Médio	Baixo

Fonte: Proprio autor

2.5 Aplicações e relevância dos controladores

Os controladores *ON-OFF* são muito utilizados para sistemas simples, como aquecedores ou sistemas de iluminação onde a simplicidade e custo baixo são mais importantes que a precisão. Um exemplo comum de aplicação de um controlador *ON-OFF* é o sensor de iluminação por presença, ilustrado na figura 8. O princípio de seu funcionamento é realizar o acionamento da energia elétrica apenas quando há a movimentação de algum objeto, visando a economia de energia elétrica. Exatron (2024)

Figura 8 – Sensor de iluminação por presença



Fonte: (Exatron, 2024)

Por outro lado, controladores PID são usados em aplicações complexas e críticas, como controle de processos químicos, sistemas de controle de motores, estabilização de aeronaves e robôs industriais, onde o desempenho preciso e a estabilidade são cruciais. Um exemplo muito comum do uso do controlador PID é em um controlador de temperatura para forno industrial, ilustrado pela figura 9.

Figura 9 – Controlador de temperatura para forno industrial



Fonte: (Alibaba, 2024)

Em suma, os controladores liga-desliga e PID são ferramentas essenciais no mundo da automação. Cada um desempenha um papel específico, complementando-se de acordo com os requisitos de precisão, complexidade e custo. Compreender suas características e limitações é fundamental para selecionar e projetar sistemas de controle eficientes e robustos.

3 Metodologia

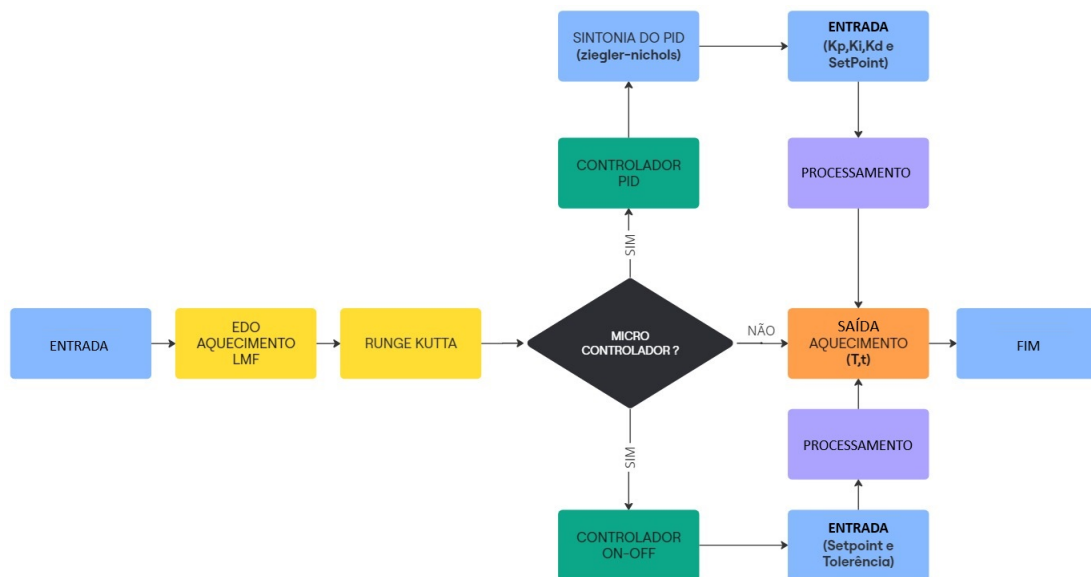
Para a elaboração deste trabalho, utilizou-se a linguagem de programação Python com o objetivo principal de proporcionar maior precisão e eficiência nas análises numéricas da liga com memória de forma.

O algoritmo foi estruturado em duas etapas: a primeira voltada ao controle de aquecimento da liga com memória de forma e a segunda dedicada à construção do modelo de Brinson para a determinação da força gerada pelo material.

3.1 Controle do aquecimento do Nitinol

Para a análise do aquecimento da liga com memória de forma, com e sem a atuação dos controladores, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma aquecimento LMF



Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, são definidos os parâmetros de entrada relacionados ao ambiente e ao material. Em seguida, é desenvolvida uma função que representa a equação diferencial ordinária (EDO) do aquecimento da liga com memória de forma.

Na sequência, implementa-se uma função para resolver EDOs utilizando o método de Runge-Kutta, cujos parâmetros de entrada incluem o tempo de simulação, a EDO de aquecimento e os parâmetros específicos do material. Um dos principais parâmetros de entrada é a variável de decisão referente à introdução de um microcontrolador.

Os parâmetros de entrada comuns aos microcontroladores *ON-OFF* e PID incluem a temperatura de setpoint e a matriz de temperaturas de aquecimento, obtida pela resolução da EDO de aquecimento da liga.

Se o controlador escolhido for o *ON-OFF*, sua função de controle será acionada e o aquecimento da liga será controlado em torno do limite inferior e superior da temperatura de setpoint.

Porém, se a função de controle selecionada for o PID, há uma função específica para realizar a sintonia do microcontrolador pelo método de Ziegler-Nichols. Após a calibração, o PID irá limitar a temperatura em torno do Setpoint, aumentando cada vez mais a precisão nos instantes iniciais, até que, em determinado momento torna-se constante.

Após todo o processo, a variável de saída será uma matriz com as temperaturas de aquecimento da liga.

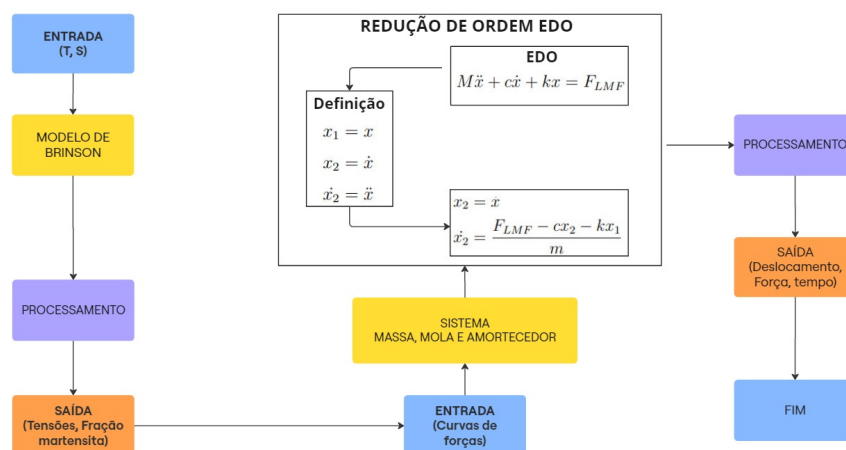
3.2 Força gerada pelo fio de Nitinol

Após determinar o perfil de aquecimento da liga com memória de forma, foi desenvolvida numericamente uma função baseada no modelo constitutivo de Brinson, com o objetivo de calcular a força gerada pelo material. Para a ativação dessa função, é necessário fornecer parâmetros específicos do material, como: comprimento total, deformação desejada e a matriz de aquecimento.

Ao término da execução da função, a saída é uma matriz que representa a variação das tensões ao longo do tempo. Para converter essa matriz em força, realiza-se o produto entre a matriz de tensões e a área da seção transversal do fio de Nitinol.

Por fim, o vetor de forças resultante é utilizado como entrada em um sistema de massa-mola-amortecedor, permitindo a análise do comportamento da força aplicada em função da posição da mola (Figura 11).

Figura 11 – Fluxograma sistema massa, mola e amortecedor



Fonte: Próprio autor.

4 Resultados

Para realizar a simulação do aquecimento da liga com memória de forma, inicialmente foi atribuído ao algoritmo os parâmetros iniciais disponibilizados nas Tabelas 2 e 3 separadas por material e sistema respectivamente.

Tabela 2 – Parâmetros do material

Variável	Dimensão	Unidade
Diâmetro (d)	$6,35 \times 10^{-3}$	m
Comprimento (L)	10^{-1}	m
Densidade (ρ)	6471,25	Kg/m^3
Calor específico (cp)	1300	$J/Kg^{\circ}C$
Resistência (R)	$5,70 \times 10^{-1}$	Ω

Fonte: Próprio Autor.

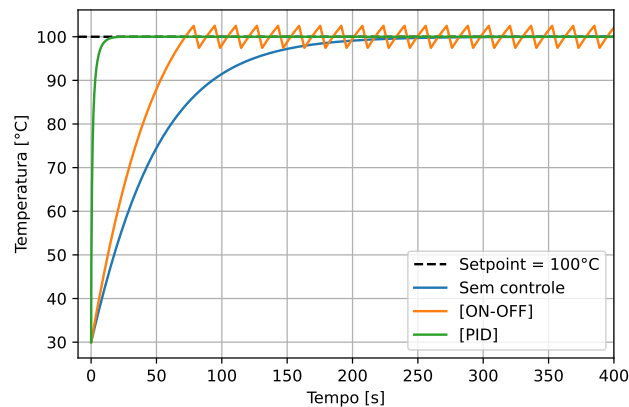
Tabela 3 – Parâmetros do sistema

Variável	Dimensão	Unidade
Temperatura ambiente (T_{∞})	30	$^{\circ}C$
Temperatura de Setpoint (T_{ref})	100	$^{\circ}C$
Deformação desejada (xp)	$3,00 \times 10^{-3}$	m

Fonte: Próprio Autor.

Antes da introdução do controlador PID no aquecimento da liga foi necessário realizar a sintonia a partir do método de Ziegler-Nichols. As constantes proporcional, integrativa e derivativa obtidas foram respectivamente $K_p = 0,3$, $K_i = 0,0225$ e $K_d = 0,006$. Em seguida, foi possível realizar a ilustração gráfica do aquecimento da liga com e sem a atuação de micro controladores, utilizando uma corrente elétrica de $I = 2,42$ Amperes (Figura 12):

Figura 12 – Aquecimento do fio de Nitinol sem e com controlador PID e ON-OFF.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Figura 12 que para o aquecimento sem atuação de controle, foi necessário uma corrente com menor intensidade para garantir a estabilização da temperatura em 100 °C.

Ao analisar a curva do aquecimento da liga com a atuação do controlador PID nota-se que o tempo de resposta é inferior em comparação a curva com o controlador *ON-OFF*. Quando o foco é estabilidade, o controlador PID apresenta uma grande vantagem em relação ao controlador *ON-OFF*, o que é justificado pelo mecanismo de ação simultâneo do controle proporcional, integrativo e derivativo que proporcionam alta precisão na diminuição do erro entre a temperatura atual e a temperatura alvo.

Na segunda parte da simulação numérica, foi inserida a lista de temperaturas controladas pelo PID no modelo de Brinson com objetivo de obter a tensão gerada pela ação do fio de Nitinol. As propriedades do material do fio necessários para a simulação foram organizados na Tabela 4:

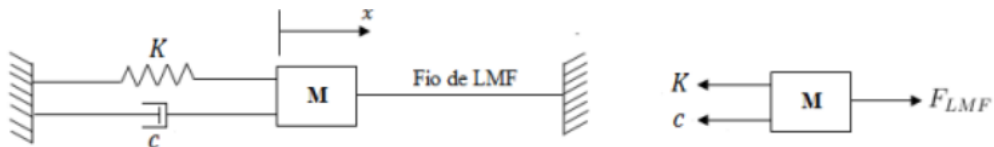
Tabela 4 – Propriedades do material do fio

Variável	Dimensão	Unidade
Deformação máxima residual (e_L)	$4,08 \times 10^{-2}$	m
Valor inicial da martensita no início do resfriamento (E_A)	$4,29 \times 10^{10}$	Pa
Valor inicial da martensita no início do aquecimento (E_M)	$2,71 \times 10^{10}$	Pa
Calor específico da fase austenita (C_A)	$10,03 \times 10^6$	$J/Kg^{\circ}C$
Calor específico da fase martensita (C_M)	$11,32 \times 10^6$	$J/Kg^{\circ}C$
Temperatura de início da transformação em austenita (A_s)	15,3	$^{\circ}C$
Temperatura final da transformação em austenita (A_f)	60	$^{\circ}C$
Temperatura de início da transformação em martensita (M_s)	45	$^{\circ}C$
Temperatura final da transformação em martensita (M_f)	-19,1	$^{\circ}C$

Fonte: Próprio Autor.

A partir da curva de tensões obtidas, foi possível obter a força a partir do produto entre a tensão e a área da seção do fio. Em seguida, foi desenvolvido um sistema massa mola amortecedor e o fio de Liga com memória de forma (Figura 13).

Figura 13 – Sistema massa, mola e amortecedor.



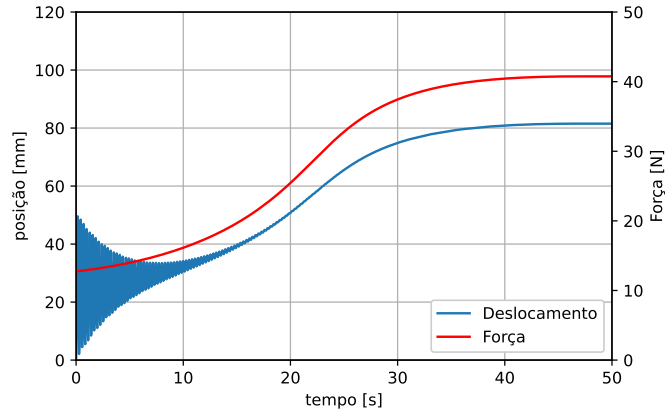
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 13, A massa (M) do sistema foi de 1 kg, a rigidez (k) de 500 N/m e o amortecimento (c) de 0,5 Ns/m. Aplicando a segunda lei de Newton e resolvendo Equação diferencial ordinária que representa a dinâmica do movimento do sistema (equação 27),

foi possível obter as curvas da posição e força em função do tempo para o aquecimento sem controle (Figura 14), com controlador liga-desliga (Figura 15) e com o controlador PID (Figura 16).

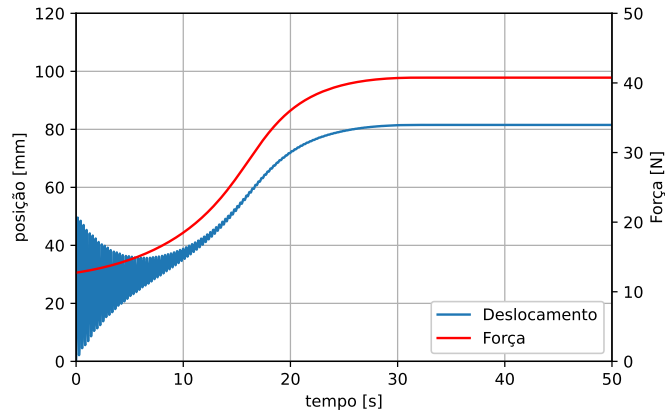
$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{LMF} \quad (27)$$

Figura 14 – Comportamento do sistema mecânico após atuação do fio de Nitinol com aquecimento sem controle.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Comportamento do sistema mecânico após atuação do fio de Nitinol com aquecimento controlado pelo liga-desliga.

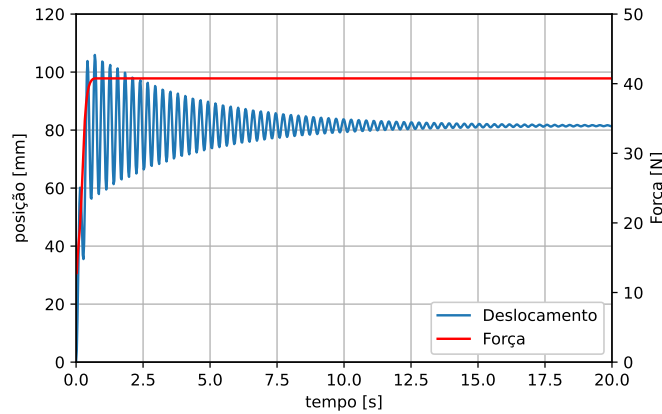


Fonte: Próprio autor.

Ao analisar as curvas em vermelho nas figuras 14 e 15 é possível notar um aumento da força com o passar do tempo, até atingir a estabilidade em 40N. Note que o sistema sob a ação do controlador *ON-OFF* permitiu uma redução significativa no tempo de resposta. Quando a análise é realizada na curva em azul, nota-se uma grande instabilidade nos primeiros 10 segundos. Essa instabilidade é justificada pela demora para atingir a temperatura de mudança de fase do fio de Nitinol. Em seguida, inicia-se um aumento

gradual da atuação do fio, evidenciando a mudança de fase de Martensita maclada para austenita. Como consequência do aumento da força, o deslocamento também torna-se maior até estabilizar-se próximo a 80 milímetros.

Figura 16 – Comportamento do sistema mecânico após atuação do fio de Nitinol com aquecimento controlado pelo PID.



Fonte: Próprio autor.

Ao iniciar o movimento do sistema ilustrado na Figura 16, a força gerada pela atuação do fio de liga com memória de forma, com o controlador PID, cresce rapidamente, atingindo aproximadamente 40 N, e em seguida se estabiliza em um valor constante ao longo do tempo (representado pela curva vermelha). Analisando o movimento do sistema, descrito pela curva azul, observa-se um comportamento de um sistema subamortecido, caracterizado por uma instabilidade inicial significativa que diminui gradualmente com o tempo. Inicialmente, a força gerada pelo fio, mesmo combinada com a ação do amortecedor, não é suficiente para estabilizar completamente o sistema em movimento. Contudo, à medida que o tempo avança, as propriedades intrínsecas da liga com memória de forma, especialmente na constante transformação de fase austenita- martensita, entram em ação contribuindo para o controle do movimento do sistema massa-mola-amortecedor, garantindo o equilíbrio dinâmico em torno de 80 milímetros.

5 Conclusão

O presente trabalho disponibilizou uma análise numérica do comportamento térmico de um fio de liga com memória de forma (Nitinol), com foco no desempenho de dois tipos de controladores: PID e *ON-OFF*. A análise do aquecimento do fio de Nitinol ilustrou que o controlador PID oferece vantagens relevantes em relação ao *ON-OFF*, principalmente em aplicações que necessitam alta precisão e estabilidade. O controlador PID demonstrou uma resposta rápida e precisa, mantendo a temperatura de referência de maneira eficiente. Essa vantagem é justificada pela combinação de ações proporcional, integral e derivativa.

A aplicação do modelo numérico de Brinson permitiu determinar as tensões geradas pelo fio de Nitinol em função do aquecimento sem controle, com controle liga-desliga e PID, além das propriedades do material. Essa segunda análise reforçou a vantagem que o controlador PID representa em relação aos outros dois cenários, principalmente no menor tempo para ocorrer a mudança de fase do fio de nitinol, o que possibilitou um menor tempo para atingir a normalidade em torno de 42N.

A inclusão do fio de Nitinol em um sistema massa-mola-amortecedor disponibilizou a capacidade do material em auxiliar na estabilização do movimento subamortecido ao longo do tempo. Esse comportamento é essencial para discutir a utilidade da liga com memória de forma em dispositivos mecânicos simples e complexos.

Os resultados obtidos neste trabalho de graduação indicam que a integração de controladores PID em sistemas com ligas com memória de forma não apenas melhora parâmetros térmicos, mas também amplia suas possibilidades de utilização em diversas soluções, desde dispositivos biomédicos até atuadores em sistemas robóticos.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de validações experimentais para consolidar a precisão e aplicabilidade dos resultados apresentados.

Referências

- ADEODATO, A. Redução de vibrações em eixo utilizando elementos de ligas com memória de forma. *Projeto Final, CEFET-Maracá*, 2014.
- Alibaba. *High Quality Programmable PID Digital Oven*. 2024. [Acessado em: 19 de dezembro de 2024]. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Programmable-PID-Digital-Oven-1600885883467.html>.
- ALVES, M. T. S. et al. Vibration control of a flexible rotor suspended by shape memory alloy wires. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 29, n. 11, p. 2309–2323, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1045389X18758179>.
- BOYD, J. G.; LAGOUDAS, D. C. A thermodynamical constitutive model for shape memory materials. part i. the monolithic shape memory alloy. *International journal of plasticity*, Elsevier, v. 12, n. 6, p. 805–842, 1996.
- BRINSON, L. C. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. *Journal of intelligent material systems and structures*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 4, n. 2, p. 229–242, 1993.
- CALKINS, F.; MABE, J.; RUGGERI, R. Overview of boeing’s shape memory alloy based morphing aerostructures. In: *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 43314, p. 885–895.
- COURA, E. A. N. Estudo da aplicação da liga niti com efeito memória de forma em atuadores de aeronaves. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- ELAHINIA, M. H.; ASHRAFIUN, H. Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator. *J. Vib. Acoust.*, v. 124, n. 4, p. 566–575, 2002.
- ENEMARK, S. *Integration of Shape Memory Alloys into Low-Damped Rotor-Bearing Systems: Modelling, Uncertainties and Experimental Validation*. [S.l.: s.n.], 2015.
- Exatron. *Sensor de Presença Touch Modular 4x2 AutoONOFF XControl*. 2024. [Acessado em: 19 de dezembro de 2024]. Disponível em: <https://www.exatron.com.br/produtos/sensor-de-presenca-touch-modular-4x2-autoonoff-xcontrol>.
- FARRENKOPF, R.; SABROFF, A.; WHEELER, P. Integral pulse frequency on-off control. *Guidance and Control—II*, Academic Press New York, p. 185, 1964.
- GARNER, L. et al. Development of a shape memory alloy actuated biomimetic vehicle. *Smart Materials and structures*, IOP Publishing, v. 9, n. 5, p. 673, 2000.
- GEROLDO, A. C. d. B. *Estudo do efeito de memória de forma de fios ortodônticos da liga Ni-Ti nas condições comercial e após tratamentos térmicos*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2009.
- GIL, F. J.; PLANELL, J. A. Shape memory alloys for medical applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 212, n. 6, p. 473–488, 1998.

- HOLMAN, J. P.; VALENZUELA, R. *Transferencia de calor*. [S.l.]: McGraw-Hill Madrid, España, 1998. v. 8.
- IKUTA, K. Micro/miniature shape memory alloy actuator. In: IEEE. *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.], 1990. p. 2156–2161.
- LEO, D. J. *Engineering analysis of smart material systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- LIU, S.-H.; HUANG, T.-S.; YEN, J.-Y. Tracking control of shape-memory-alloy actuators based on self-sensing feedback and inverse hysteresis compensation. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 10, n. 1, p. 112–127, 2009.
- NAVARRO, R. F. A evolução dos materiais. parte1: da pré-história ao início da era moderna. *Revista eletrônica de materiais e processos*, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2006.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5^a. [S.l.]: São Paulo: Pearson, 2011.
- PAIVA, A. Modelagem do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma. *Dr. Tese, PUC-Rio, Rio de Janeiro*, 2004.
- PATEL, V. V. Ziegler-nichols tuning method: Understanding the pid controller. *Resonance*, Springer, v. 25, n. 10, p. 1385–1397, 2020.
- PEREIRA, K. B.; AMARAL, W. N. do; GARBI, G. P. Concepção e montagem de uma unidade didática analógica de apoio ao ensino da teoria clássica de controle automático. *Revista Ciências Exatas*, v. 18, n. 1, 2012.
- PICCIRILLO, V. et al. Deflection control of an aeroelastic system utilizing an antagonistic shape memory alloy actuator. *Meccanica*, Springer, v. 53, p. 727–745, 2018.
- PITTACCIO, S. et al. Applications of shape memory alloys for neurology and neuromuscular rehabilitation. *Journal of functional biomaterials*, MDPI, v. 6, n. 2, p. 328–344, 2015.
- PRETO, E. Dissertação (MSc. Thesis) — São Paulo State University (UNESP), 2022.
- PRETO, E. et al. Experimental investigation of vibration control of flexible rotors using shape memory alloys. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 32, n. 9, p. 095001, jul 2023. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/ace5f8>.
- SILVA, R. d. O. Atenuação de vibrações em sistemas que utilizam molas de liga de memória de forma. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2017.
- WALDROP, G. S. *Operationally Efficient Propulsion System Study (OEPSS) data book. Volume 2: Ground operations problems*. [S.l.], 1990.