

ESTUDO SOBRE A CAPACIDADE DE AMORTECIMENTO DE MATERIAIS METÁLICOS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA: PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVO DE AMORTECIMENTO.

João Nery de Paiva Neto¹, Rômulo Pierre Batista dos Reis²

Resumo: As ligas com memória de forma LMF consistem em um grupo de materiais metálicos que possuem a habilidade de retornar a um formato ou tamanho previamente definido quando submetidos a um ciclo térmico adequado. A característica principal destes materiais é a habilidade de sofrer grandes deformações e, em seguida, recuperar sua forma original quando a carga é removida ou o material é aquecido e ainda apresentam grande capacidade de amortecimento. O objetivo do presente trabalho é determinar um conjunto de pelo menos cinco LMF com as seguintes características: alto valor de amortecimento, alta resistência e que apresente ao mesmo tempo o estado super elástico em temperatura ambiente. Entre essas cinco uma será selecionada para que seja aplicada em um dispositivo de amortecimento.

Para selecionar esse conjunto foi realizada uma busca em sites indexados com as seguintes palavras-chave: amortecimento, LMF super elástica e característica mecânica, em seguida foram tomados os 20 primeiros artigos com relevância ao tema, até encontrar as cinco ligas com as características descritas anteriormente. Os resultados das pesquisas nos forneceram o conjunto de cinco ligas, sendo três delas a base de cobre e duas a base de níquel. Visando facilitar a escolha foram selecionadas duas ligas para fim de comparação, sendo a liga Cu-Zn-Al e Ni-Ti as mais estudadas. Como resultado final, foi escolhida a liga Ni-Ti pois a mesma apresentou as melhores propriedades solicitadas para o desenvolvimento do dispositivo de amortecimento mecânico.

Palavras-chave: Liga com memória de forma; Amortecimento; Vibrações, Baja.

1. INTRODUÇÃO

Segundo [1] materiais avançados têm desempenhado um papel de liderança no desenvolvimento de inovações e conquista de engenharia. Dentre os materiais avançados as ligas com memória de forma LMF vêm sendo bastante estudadas por suas características únicas e sua ampla aplicabilidade. Isso se dá devido a capacidade das LMF de responder às mudanças externas de temperatura, carregamento/descarregamento mecânico alterando suas propriedades físicas e/ou mecânicas. As aplicações variam entre detecção e controle, amortecimento de vibração, áreas biomédicas, automotivas e aeroespaciais.

Neste trabalho focaremos nosso estudo em aplicações automotivas, mais precisamente na área de amortecimento de vibrações. Uma das características das LMF é sua capacidade de amortecimento, dito isso, vamos analisar qual liga, dentro de um universo de 3 ligas a base cobre e 2 a base níquel, possui maior capacidade de amortecimento, para que seja aplicada no desenvolvimento de um dispositivo de amortecimento mecânico.

Em projetos de amortecimento automotivo faz-se necessário que o sistema seja capaz de absorver todas as irregularidades do terreno, segundo [4,5] tendo como principais funções manter o contato permanente das rodas com o solo, prover estabilidade durante o passeio e proporcionar conforto aos ocupantes do veículo. No âmbito da Competição Baja SAE tais funções também são desejadas, além de que, ter um carro mais leve e com maior emprego de tecnologia aplicado ao protótipo pode conferir uma pontuação maior a equipe, visando obter essas metas pretendemos reduzir a massa final do veículo bem como incrementar mais inovação ao mesmo, baseado nesse cenário surge a ideia de realizar um estudo teórico sobre dispositivos de amortecimento aplicando um material avançado, que no caso foi selecionado as ligas com memória de forma.

Além de ser uma inovação e uma alternativa ao uso de amortecedores comerciais de veículos que não são adequados ao uso fora-de-estrada onde a competição se encaixa, pretende-se reduzir a massa final do dispositivo comparado ao dispositivo tradicional utilizado, sendo esses os modelos Fox Float R e Fox Evol 3, com massas de 1,4 kg e 2,3 kg respectivamente, com esse projeto estima-se uma redução de pelo menos 10% da massa em cada dispositivo.

Vale ressaltar que essas ligas têm propriedades superiores aos materiais convencionais como alguns aços por exemplo, o que faz com que a indústria volte o olhar para esses materiais inteligentes como uma substituição mais adequada em algumas aplicações. [1,4]

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Revisão Bibliográfica

2.1.1. Ligas com memória de forma

O termo LMF é aplicado a esse grupo de materiais metálicos que demonstram a capacidade para retornar a algumas formas ou tamanhos previamente definidos, quando submetido a procedimento térmico. Geralmente, esses materiais podem ser plasticamente deformados em temperatura relativamente baixa, e após a exposição a uma temperatura mais alta retornar à sua forma anterior a deformação.

Materiais que exibem memória de forma somente após aquecimento são referidos como tendo uma memória de forma unidirecional. Alguns materiais também sofrem mudança de forma ao resfriar, estes materiais têm uma memória de forma bidirecional. Embora exista uma variedade relativamente grande de ligas com memória de forma, somente aquelas que podem recuperar quantidades substanciais de tensão ou que geram força significativa ao mudar de forma são de interesse comercial. Até a presente data, estas tem sido as ligas de níquel-titânio e ligas à base de cobre.

A primeira observação registrada do efeito memória de forma foi feita por Chang e Read em 1932. Foi notado a reversibilidade da transformação em ligas Au-Cd por observações metalográficas [4].

Entretanto, apenas em 1963 que William J. Buehler e colegas do laboratório de Artilharia Naval dos Estados Unidos em White Oak, Maryland, descobriram o efeito em ligas níquel-titânio equiatômico (Ni-Ti) [1].

As ligas Ni-Ti ficaram bastante populares pelas suas propriedades de memória de forma e também pelo efeito de superelasticidade o que lhes permite uma recuperação de até 8%. Já as ligas à base de cobre exibem também características parecidas, sendo estas mais baratas e mais leves.

2.1.2. Transformação Martensítica

As LMF formam um subconjunto de uma vasta classe de materiais inteligentes, onde, as funcionalidades surgem de suas mudanças microestruturais quando sujeitas a estímulos não mecânicos externos, como por exemplo mudanças na temperatura [1].

Basicamente, as LMF apresentam duas fases cristalográficas bem definidas: austenita e martensita [6].

Essas transformações de fase são resultado de distorções na rede de cisalhamento. A fase austenita apresenta uma estrutura cristalina B2 ordenada se comparada com a fase martensítica que apresenta estruturas tetragonais, ortorrômbicas e monoclinicas que vai depender dos tipos de transformações que a LMF será submetida [1,6].

Segundo [1, 7] afirmam que as propriedades das LMF estão diretamente relacionadas com a temperatura e tensão que estão sujeitas. Geralmente, possuem quatro temperaturas de transformação: A_s e A_f são as temperaturas inicial e final da austenita, respectivamente. M_s e M_f temperaturas de formação da martensita. Na Figura 1 ao atingir A_s tem-se o início da austenita caso A_f seja alcançado se tem 100% de austenita. Após resfriar o material atinge-se M_s que é o início da formação da martensita, logo, se M_f for atingido terá 100% de martensita.

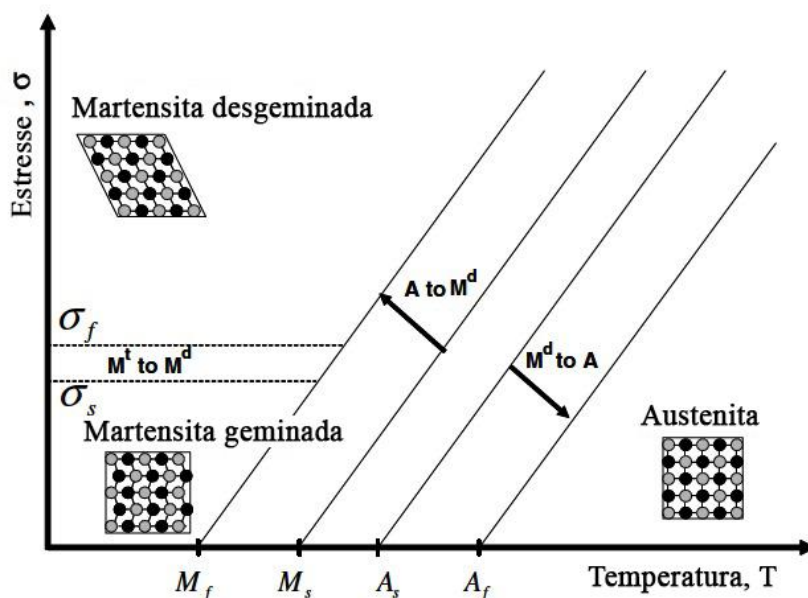


Figura 1. Diagrama de fases tensão-temperatura para uma LMF.
Adaptado de Lagoudas (2008).

Essa natureza da transformação martensítica é o que proporciona os efeitos, de termo elasticidade, superelasticidade e memória de forma.

2.1.3. Aplicações

Materiais inteligentes estão atraindo bastante atenção de engenheiros e cientistas em todo o mundo à medida que aumenta a ênfase na confiabilidade e na multifuncionalidade. Nas últimas décadas, cientistas de todo o mundo têm buscado desenvolver formas de converter energia térmica em trabalho mecânico através do uso de LMF e implementar essas soluções para aplicações do mundo real. Um exemplo bastante conhecido foi o acoplamento de tubo hidráulico usado no F-14 em 1971. Desde então engenheiros em vários campos de atuação continuaram a usar as propriedades únicas das LMF para solucionar problemas de engenharia [5].

As LMF atraíram um grande interesse em vários campos de aplicação, desde aeroespacial e naval até instrumentos cirúrgicos, implantes médicos e área automotiva.

De uma maneira geral, as LMF apresentam baixa resistência à fadiga quando comparadas a outras ligas, porém, vale ressaltar, que as LMF são capazes de gerar grandes forças de restituição com um consumo de energia relativamente baixo, o que é uma característica que as diferenciam em diversas aplicações.

2.1.4 Aplicações na Medicina

O efeito memória de forma e as características pseudoelásticas aliadas à biocompatibilidade os tornam um candidato atraente para aplicações médicas. A junção dessas características únicas levou ao desenvolvimento de diversas aplicações como stents, filtros, fios ortodônticos bem como dispositivos para cirurgia minimamente invasiva. Um requisito importante para LMF, ou qualquer outro material a ser usado no corpo humano, é que seja biocompatível. A biocompatibilidade é a propriedade do material permanecer atóxico durante seu período funcional dentro do corpo humano. Outra característica de relevância é sua biofuncionalidade, que é a capacidade de funcionar de forma desejável para a sua vida útil no ambiente do corpo humano. Esses dois requisitos são de extrema importância para a aplicação de LMF na indústria médica. A Figura 2 mostra como o tratamento ortodôntico é realizado com fios de liga Ni-Ti.



Figura 2. Tratamento ortodôntico utilizando LMF [5].

2.1.5 Aplicações Aeroespaciais

A implementação das LMF na indústria aeroespacial abrangeu áreas de aeronaves de asa fixa, aeronaves de asa rotativa, naves espaciais e o trabalho em todas essas áreas ainda está progredindo.

Os *flaps* são estruturas móveis, inseridas nas asas, que promovem o ganho ou a perda de altitude ou a mudança de direção de um avião. A manobra das aeronaves depende da eficiência dos *flaps*.

Essas estruturas geralmente utilizam extensos sistemas hidráulicos que necessitam de bombas e atuadores, o que encarece o projeto e adiciona um maior custo ao mesmo, dois pontos críticos do projeto de aeronaves.

Uma forma de minimizar tais problemas estão sendo estudadas, e as LMF têm sido potenciais soluções. A Figura 3 mostra os *flaps* utilizando fios de LMF.

2.1.6 Aplicações Automotivas

Já no campo automotivo as LMF têm sido usadas para aplicações que variam de absorção de impacto até detecção e atuação. O comportamento pseudoelástico fornece um sistema eficaz para dissipar vibrações e impactos. Esta propriedade tem sido usada para absorção de impacto em veículos blindados e aplicações comerciais. Devido ao EMF também foi implementado para persianas de acionamento que cobrem o farol de neblina para evitar danos. Essas ligas também podem ser usadas para fins de sensor e atuação simultaneamente. Uma aplicação que explora esse comportamento é a mola LMF para a contínua transmissão variável na classe Mercedes A. A mola funciona como um sensor que monitora a temperatura e aciona uma válvula em uma temperatura específica, que altera a

direção do fluxo de óleo. Outro tipo de aplicação é em mecanismos, a Figura 4 mostra um mecanismo de limpador de para-brisas utilizando LMF [5].

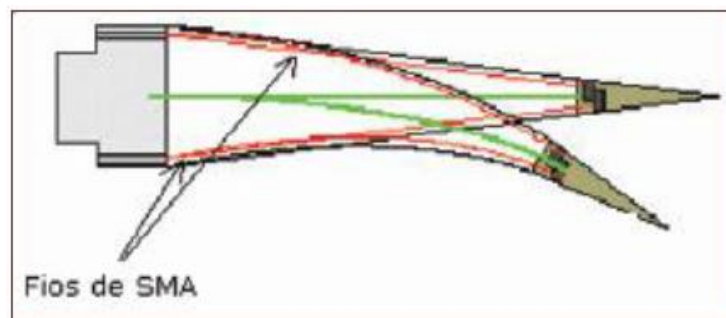


Figura 3. Flaps com fios de LMF [5].

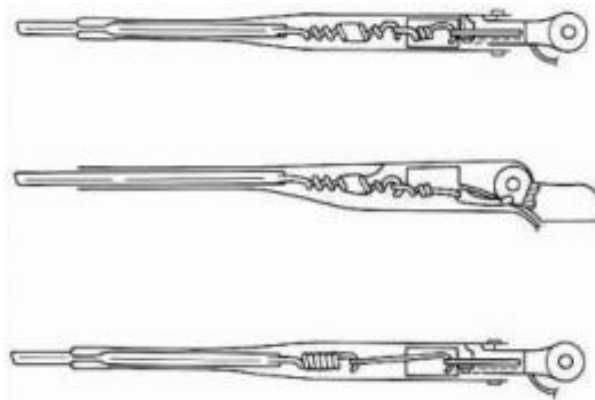


Figura 4. Mecanismo de limpador de para-brisas [5].

2.2. Comportamento Termomecânico

2.2.1. Efeito de memória de forma

Uma LMF exibe o efeito memória de forma quando é deformada na fase martensítica geminada e depois descarregada a uma temperatura abaixo de A_s .

Quando for subsequentemente aquecida acima de A_f , a LMF recuperará sua forma original, transformando-se novamente na fase austenítica original [1,7,8].

A natureza do EMF pode ser melhor compreendida seguindo os caminhos de carregamento em um espaço combinado de tensão-deformação-temperatura, como mostrado na figura 2.

A partir da fase pai (ponto A), o resfriamento sem estresse de austenita abaixo das temperaturas de transformação direta (M_s e M_f) resulta na formação de martensita geminada (ponto B).

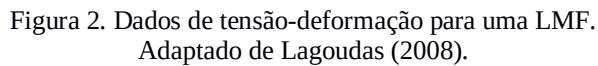
Quando os gêmeos de martensita é submetida a uma tensão aplicada que excede o nível de tensão inicial (σ_s), o processo de reorientação é iniciado, resultando no crescimento de certas variantes martensíticas favoravelmente orientadas, que crescem à custa de outras variantes menos favoráveis. O nível de estresse para reorientação das variantes é muito menor do que a tensão de escoamento plástico permanente da martensita [1,7,8].

A separação do processo é completado em um nível de tensão (σ_f), que é caracterizado pelo fim do platô no diagrama (σ - ϵ). O material é então elasticamente descarregado de C para D e o estado martensítico desgeminado é mantido [1,7].

Sob aquecimento na ausência de estresse, a transformação reversa inicia, como o A atinge a temperatura A_s , (em E) e é completada na temperatura A_f (ponto F), acima da qual existe apenas a fase austenítica parental.

Na ausência de deformação plástica permanente gerada durante o descarregamento, a forma original da LMF é recuperada, indicada por A [7,8].

O resfriamento subsequente para martensita resultará novamente na formação de variantes martensíticas geminadas auto acomodadas sem mudança de forma, e todo o ciclo do EMF pode ser repetido. O fenômeno descrito é o chamado efeito memória de forma unidirecional, porque a recuperação de forma é alcançada apenas durante o aquecimento após o material ter sido distorcido por uma carga mecânica aplicada [6,7,8].



A transformação de fase direta e reversa durante um ciclo pseudoelástico completo resulta em uma histerese, que, no espaço σ - ϵ , representa a energia dissipada no ciclo de transformação. Os níveis para tensão de transformação e o tamanho da histerese variam dependendo do material e das condições de contorno de teste [7].

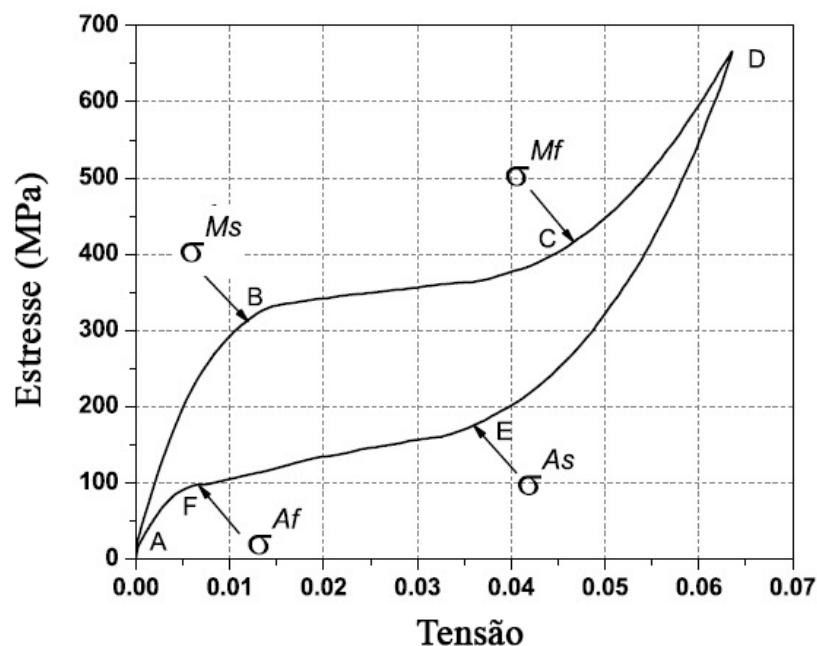


Figura 3. Típico ciclo de carregamento pseudoelástico.
Adaptado de Lagoudas (2008).

2.3 Propriedades de Análise

2.3.1 Amortecimento

O amortecimento ou atrito interno é uma propriedade sensível, tanto em escala macroscópica quanto microscópica. A energia mecânica de um sistema é dissipada pela geração de calor ou energia. Esta dissipação de energia ocorre durante a presença de forças de fricção interna que tendem a resistir ao movimento do material. O atrito interno está associado aos defeitos de microestrutura como contorno de grãos e impurezas [2,3].

2.3.2 Amortecimento Interno

O amortecimento interno está intimamente associado aos defeitos de microestrutura do material metálico, como por exemplo contornos de grãos e impurezas, efeitos termo elásticos causados por gradientes locais de temperatura, movimentos de discordâncias. Para esse tipo de amortecimento há dois tipos diferentes de modelos que são utilizados para o determinar, o amortecimento viscoelástico e o amortecimento histerético [2,3].

2.3.3 Amortecimento Viscoelástico

O movimento de um sistema pode ser descrito por equações diferenciais, baseadas na Lei de Newton, que envolvem parâmetros variáveis no tempo. Os sistemas podem também ser classificados de acordo com o número de graus de liberdade (GDL) do movimento, ou seja, o número de coordenadas independentes para descrever o movimento [2,3].

No modelo viscoelástico parte-se do pressuposto de que a natureza do movimento é viscosa e a força de atrito é proporcional à velocidade, representando uma oposição ao movimento, sendo descrita pela Equação 1:

$$F = -c \dot{x} \quad (1)$$

onde c é uma constante de proporcionalidade e $\dot{x}$ a velocidade de deslocamento de uma massa em relação a um ponto fixo.

2.3.4 Amortecimento Histerético

Para alguns tipos de materiais, observa-se que a força de amortecimento não depende significativamente da frequência de oscilação (ou frequência de movimento harmônico). Este tipo de amortecimento interno é chamado de amortecimento histerético. A constante de amortecimento para esse caso pode ser descrita como mostra a

Equação 2, e a Equação 3 define o amortecimento histerético [2,3].

$$c = \frac{h}{\omega} \quad (2)$$

$$F = -\frac{h}{\omega} \dot{x} \quad (3)$$

2.3.5 Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural é resultado da dissipação de energia mecânica causada por fricção devido ao movimento relativo entre componentes e por impacto intermitente nas articulações de um sistema mecânico ou estrutura. O comportamento da energia de dissipação depende do sistema mecânico em particular e, portanto, é extremamente difícil desenvolver um modelo analítico generalizado. A dissipação de energia é normalmente representada pelo modelo de Coulomb [2,3].

3. Resultados e Discussões

Com base nos artigos estudados foram selecionadas cinco ligas, estas sendo de formação binária, terciária e quaternária. Três delas com cobre em sua composição e duas à base de níquel.

As ligas escolhidas possuem as seguintes estruturas: Cu-Al-Be, Cu-Al-Be-Mn, Cu-Zn-Al, Ni-Ti e Ni-Ti-Nb [1,10,11].

Para a seleção das ligas, além das propriedades mecânicas e de amortecimento, outros fatores como custo, facilidade de obtenção e fabricação também foram analisados.

As ligas à base de cobre em geral apresentam boa capacidade de amortecimento, são leves e tem um menor custo se comparado com as ligas à base de níquel, no artigo (Avaliação do efeito memória de forma e características de amortecimento de ligas com memória de forma Cu-Al-Be-Mn e Cu-Zn-Al), os autores asseguram que além das ligas estudadas, outras ligas com cobre em sua composição possuem comportamento parecido em relação à memória de forma e capacidade de amortecimento, foram caracterizados os amortecimentos utilizando um analisador mecânico dinâmico (AMD) [11].

A fim de facilitar a comparação e a seleção final, do conjunto inicial das cinco ligas, foram selecionadas apenas duas, no trabalho (Ligas com Memória de Forma, Funakubo, H; Kennedy, J.B) os autores afirmam que as ligas Ni-Ti e Cu-Zn-Al são as mais conhecidas comercialmente, o que facilita uma possível obtenção e também pelo fato de serem as mais utilizadas dentre o universo das ligas com memória de forma.

Ainda de acordo com os mesmos, em se tratando de aplicações práticas essas ligas são as mais favoráveis, as duas apresentam os efeitos de memória de forma e superelasticidade, porém possuem outras propriedades um pouco divergentes, que podem ter um peso maior para a definição final.

Embora como já falado o fator custo seja relevante, sendo a liga Ni-Ti com um custo mais elevado se comparado com a Cu-Zn-Al, de forma geral a liga Ni-Ti é bem superior, uma comparação é mostrada na Tabela 1 [1,7].

Tabela 1. Comparação entre as LMF comercializadas [1,7,5].

Propriedade	Liga Ni-Ti	Liga Cu-Zn-Al
Deformação recuperável	Máx. 8%	Máx. 4%
Tensão gerada na recuperação	Máx. 400 MPa	Máx. 200 MPa
Fadiga	$\varepsilon = 0,02$ $\varepsilon = 0,005$	$\varepsilon = 0,02$ $\varepsilon = 0,005$
Resistência a corrosão	Boa	Problemática
Trabalhabilidade	Pobre	Razoável
Conformação	Relativamente fácil	Razoavelmente difícil
Densidade	6,4 – 6,5 (g/m ³)	7,54 – 8 (g/m ³)
Capacidade de amortecimento	15 – 20%	15 – 35%

As ligas Cu-Zn-Al exibem excelentes propriedades de memória de forma e superelasticidade, mesmo apresentando uma deformação recuperável menor que a liga Ni-Ti estas ainda sim são candidatas para a aplicação proposta. Essas ligas ainda permitem ajustes das temperaturas de transformação dentro de uma faixa muito extensa, entre 0° C e mais de 150° C.

Entretanto, de acordo com o artigo (Características de amortecimento de ligas com memória de forma binária e ternária de Ni-Ti) as ligas Ni-Ti se destacam por apresentarem propriedades notáveis, tais como: efeito memória de forma, superelasticidade, elevada capacidade de amortecimento de vibrações mecânicas, ductilidade, resistência a corrosão, menor densidade e biocompatibilidade se comparada às demais ligas. O fato dessa liga apresentar uma baixa densidade até mesmo em relação a alguns outros aços e ligas é muito importante, visto que uma das metas é a redução no peso do dispositivo de amortecimento. Isso não só as torna as ligas mais comercializadas e utilizadas,

mas, também a liga mais indicada para a aplicação no dispositivo de amortecimento proposto nesse trabalho. No trabalho (Comportamento de amortecimento de ligas com memória de forma à base de Ni-Ti), os autores afirmam que essas ligas exibem alta capacidade de amortecimento durante a transformação de fase ou no estado martensítico, visto que a temperatura é um fator relevante essa é uma propriedade bastante interessante para a aplicação a qual o trabalho sugere. Neste mesmo trabalho a capacidade de amortecimento foi investigada usando medições de um AMD, onde para várias combinações percentuais de níquel e titânio foram analisadas as suas propriedades de amortecimento, a liga com 49,2% de níquel e 50,8% de titânio tem uma capacidade de amortecimento maior durante a transformação de fase. Em geral as ligas à base de cobre tem uma maior capacidade de amortecimento [1,7], como apresentado na tabela 1, entretanto a liga Ni-Ti apresenta alta capacidade de amortecimento tanto na fase martensítica como na zona de transição [8], além do que as demais propriedades mecânicas comparadas são de extrema importância para a seleção final.

4. Conclusão

A partir do estudo feito, e após realizada todas as comparações, chegou-se à conclusão de que, a liga mais indicada para o desenvolvimento do dispositivo de amortecimento é a liga Ni-Ti.

Embora as ligas à base de cobre em geral possuam maior capacidade de amortecimento e um custo menor, as mesmas têm baixa resistência, maior densidade e baixa taxa de recuperação se comparada a liga escolhida. Por fim, embora tenha o aumento do custo do dispositivo, as outras propriedades oferecidas pelo material justificam sua escolha final, fazendo com que as metas de amortecimento, redução de massa e inovação descritas no início sejam alcançadas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RAO, ASHWIN; SRINIVASA, ARUN; REDDY, J.N. Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators. [S.l.]: Springer, 2015. 129 p. ISBN 978-3-319-03187-3.
- [2] GILLESPIE, THOMAS D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 1. Ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc, 2015. 471 p. ISBN 1-56091-199-9.
- [3] MILLIKEN, WILLIAM F; MILLIKEN, DOUGLAS L. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc, 1995. 857 p. ISBN 1-56091-526-9.
- [4] FREMOND, M; MIYAZAKI, S. **Shape Memory Alloys**. New York: Springer, 1996. 152 p. v. 1. ISBN 978-3-211-82804-5.
- [5] YAMAUCHI, K; TSUCHIYA, K; MIYAZAKI, S. **Shape memory and superelastic alloys**: Technologies and applications. High Street, Sawston, Cambridge: Woodhead, 2011. 223 p. ISBN 978-1-84569-434-0.
- [6] DELAEY, L; KRISHNAN, R.V; WARLIMONT, H. Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations: Part 1 Structural and microstructural changes associated with the transformations. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, [S.l.], ano 1974, p.15, 25 set. 1974.
- [7] LAGOUDAS, DIMITRIS C. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. Texas, USA: Springer, 2008. 433 p. ISBN 978-0-387-47684-1.
- [8] OTSUKA, K; WAYMAN, C.M. Shape Memory Materials. 1998. Cambridge University Press. 284 p.
- [9] CAI, W; MENG, X.L; ZHAO, L.C. Recent development of TiNi-based shape memory alloys. **Science Direct**, China, p. 7, 17 jun. 2022.
- [10] CAI, W; MENG, X.L; ZHAO, L.C. Damping behavior of TiNi-based shape memory alloys. **Science Direct**, China, p. 7, 17 jun. 2022.
- [11] MONTECINOS, Susana; OFELIA MORONI, Maria; SEPÚLVEDA, Aquiles. Superelastic behavior and damping capacity of CuAlBe alloys. Materials Science and Engineering, [S. l.], p. 6, 15 jun. 2022.
