

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA COMO ATUADORES EM AERONAVES NÃO TRIPULADAS

Mayara Auxiliadora Castilho Benites, mayabenites@gmail.com¹

João Gabriel Benedito Duarte, joaogpix@gmail.com¹

Edson Godoy, godoy.edson@hotmail.com¹

Marcia Moreira Medeiros, marciam.medeiros@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso, Avenida dos estudantes, número 5055, Bairro Cidade Universitária, Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil, CEP 78736900

Resumo: Ligas com efeito memória de forma (LMFs) têm sido amplamente estudadas, tanto no quesito de análise microestrutural e de propriedades mecânicas, quanto na pesquisa e desenvolvimento de aplicabilidades. Assim, sabendo que estas possuem a capacidade de recuperar a sua forma original a partir da aplicação de cargas termomecânicas, buscou-se fazer um estudo para compreender o seu comportamento e avaliar a possibilidade de utilizá-las em aeronaves, mais especificamente em Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs). Com o intuito de otimizar e simplificar alguns sistemas das aeronaves, a fim de que haja melhorias na relação desempenho/peso, é vantajoso substituir os servos mecânicos e sistemas hidráulicos pelas LMFs, que funcionarão como atuadores da aeronave. Como meio de se obter isto, estudou-se o sistema de acionamento da liga e analisou-se o material a ser utilizado quanto a sua forma, tamanho, composição química, entre outros parâmetros. Em suma, este trabalho pretende investigar e avaliar a aplicação destas ligas com efeito memória de forma em VANTs de pequeno porte, bem como fazer o ensaio mecânico desta liga a fim de averiguar o seu comportamento em resposta a aplicação de uma corrente elétrica. Assim, levantaram-se as ligas comercialmente disponíveis e as suas propriedades e características, fazendo uma análise e ranking das que teriam potencial de uso para a aplicação, visando à viabilidade econômica de cada liga de interesse. Paralelo a este estudo, fez-se cálculos prévios para verificar a força necessária que cada fio desta liga deveria suportar para funcionar como atuador e, após tais análises, optou-se por escolher a liga composta por níquel-titânio, que é comercialmente chamada de Flexinol®. Ademais, buscou-se compreender e selecionar alguns tipos de sistemas de acionamento de fios com efeito memória de forma (EMF) já existentes e que são utilizados no meio aeronáutico. Finalmente, investigando o comportamento do fio, pensou-se em efetuar um ensaio mecânico deste para atestar a corrente de ativação do efeito memória de forma, a corrente máxima do fio até o seu rompimento, o tempo máximo que o fio fica sob o EMF sem perder esta propriedade e o deslocamento máximo do fio durante a ativação do EMF. Uma bancada experimental foi construída e os testes foram realizados. Efetuando o ensaio mecânico, pode-se entender melhor o comportamento do fio, além de comprovar que a corrente de seu acionamento do EMF de fato é a mesma informada pelo fabricante. Além disso, ao realizar o ensaio mecânico, descobriu-se que a corrente máxima que o fio rompe sob efeito de uma massa constante é de 0,6 A e que o seu deslocamento máximo quando ativado pela corrente de 0,2 A é, em média, de 0,0132 m. Por outro lado, pode-se entender que o fio perde a sua propriedade de EMF quando submetido a uma mesma corrente, abaixo da corrente de rompimento, em um longo período de tempo e que, portanto, torna-se interessante que o seu uso seja dado quando não necessite de aplicação contínua e constante de corrente elétrica por um grande intervalo de tempo. Desta forma, isto proporciona ter um novo olhar para o desenvolvimento de um sistema de acionamento deste fio, de forma a evitar que ele perca sua propriedade EMF ou se rompa no meio de sua aplicação. Todavia, entende-se que neste aspecto, estudos mais aprofundados sejam necessários para investigar o seu comportamento.

Palavras-chave: ligas com efeito memória de forma, veículos aéreos não-tripulados, ensaio mecânico.

1. INTRODUÇÃO

Ligas com efeito memória de forma (LMFs) foram inicialmente mais usadas e exploradas nos anos 60 com a criação de uma liga metálica denominada de Nitinol (Níquel-Titânio), que veio revolucionar a forma e a aplicação deste material no cotidiano. Já existiam, anteriormente, ligas com memória de forma (como as ligas de ouro e cádmio), mas o seu manuseamento e tratamento eram bastante difíceis conforme os vários trabalhos apresentam (Azom; Fernandes

2003; Hoi-Yin e Lin). Para tanto, torna-se interessante a escolha da composição química Ni-Ti como a liga com efeito memória de forma a ser estudada e utilizada neste presente projeto.

Assim, LMFs têm sido largamente estudadas atualmente, tanto no quesito de análise microestrutural e de propriedades mecânicas, quanto na pesquisa e desenvolvimento de aplicabilidades conforme os estudos apresentados por vários trabalhos (Patoor, 2006; Huang, 1998; Bhattacharya, 2003; Van Humbeeck, 1991; Ölander, 1932 e Buehler *et al.*, 1963). Desta forma, sabendo que estas LMFs possuem a capacidade de recuperar a sua forma original a partir da aplicação de cargas termomecânicas, buscou-se fazer um estudo para compreender o seu comportamento e uma avaliação da possibilidade de utilizá-las em aeronaves assim como Duerig (1990) e Jardine *et al.* (1997) já o fizeram. Além disso, Hartl (2007), Rasi (2008), Castilho *et al.* (2011), Magalhães (2015), Medeiros *et al.* (2008) e SAE Brasil mostram que, nos últimos tempos, houve um grande crescimento na utilização de Veículos Aéreos não-Tripulados (VANTS) para questões de lazer, atividades comerciais, como no ramo agrícola, e de estratégia militar. Para tanto, faz-se necessário um estudo aprofundado para poder desenvolver e otimizar novas tecnologias e contribuir com o desenvolvimento da sociedade.

Desta forma, no intuito de otimizar e simplificar alguns sistemas das aeronaves, a fim de que haja melhorias na relação desempenho/peso, bem como na facilidade de controlá-la remotamente e na realização de manobras precisas, torna-se vantajoso fazer a substituição de servos mecânicos e sistemas hidráulicos pelas LMFs, que funcionarão como atuadores da aeronave.

Para isto, é interessante o estudo do sistema de acionamento desta liga, analisando o material a ser utilizado quanto a sua forma, tamanho, composição química, comportamento do efeito memória de forma, entre outros parâmetros, a fim de selecionar o sistema mais abrangente ou otimizar os já existentes. Segundo Souza *et al.* (2015), a utilização de molas helicoidais de Ni-Ti acopladas na longarina da asa do VANT e acionadas por meio de um circuito elétrico a partir de uma bateria fixada na asa do avião, pareceu ser um sistema vantajoso para a sua aplicação na competição SAE BRASIL Aerodesign.

Por outro lado, a utilização de fios de Ni-Ti fixados na corda raiz da asa até o bordo de fuga do avião, que precede o início do flap, e acionados por meio de dois circuitos de chaveamento intercalados se tornou interessante para Senthilkumar (2012), devido ao projeto ser compacto e simples. Neste mesmo caminho, Coura (2016) também utilizou de fios de Ni-Ti para simular e modelar um atuador de aeronave, mais especificamente para mover uma das superfícies de comando da aeronave, o flap, avaliando alguns parâmetros como a quantidade de movimento do atuador e a tensão gera e a deformação recuperada pelo fio.

Em suma, buscando compreender tais variáveis descritas acima, este projeto pretendeu estudar e avaliar a aplicação destas ligas com efeito memória de forma em VANTS de pequeno porte. Para tanto, foi realizado um levantamento das ligas comercialmente disponíveis, elencando suas propriedades e fazendo uma análise de custo x benefício. Posteriormente, será feito um estudo para definir o modo de ativação da LMF e controle da mesma. Por fim, uma análise da aplicação da LMF será realizada em uma aeronave não tripulada, visando obter a melhor integração da LMF à superfície de controle a ser estudada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para dar início a este projeto, levantaram-se as ligas comercialmente disponíveis e as suas propriedades e características, fazendo uma análise e ranking das que teriam potencial de uso para o projeto. Posteriormente, dentre as ligas selecionadas, estudou-se a viabilidade econômica de cada liga de interesse e, paralelo a este estudo, fez-se cálculos prévios para verificar a força necessária que cada fio de uma liga com memória de forma deveria suportar para funcionar como atuador. Assim, após tais análises e estudos, optou-se por escolher a liga composta por níquel-titânio, que é comercialmente chamada de Flexinol® e pode ser encontrada em Dynalloy.

Ademais, dando continuidade ao projeto, buscou-se compreender e selecionar alguns tipos de sistemas de acionamento de fios com efeito memória de forma já existentes e que são utilizados no meio aeronáutico. Para tanto, estudos apontaram que o sistema de acionamento mais adequado para este trabalho, que é o mais simples e compacto, é apresentado por Senthilkumar (2012). Possivelmente, algumas otimizações e/ou modificações devem ser feitas para adaptá-lo ao intuito de análise projeto a fim de atender também as limitações e dificuldades construtivas encontradas futuramente.

Por fim, em paralelo a tais atividades desenvolvidas, buscou-se realizar uma nova revisão bibliográfica sobre os principais assuntos temáticos relacionados a este trabalho com o intuito de agregar conhecimento e novas possibilidades de adaptações do sistema pensado com o que já é utilizado atualmente, além de gerar novos ramos de análises e estudos futuros. Assim, foram feitos estudos na área de engenharia dos materiais para verificar o comportamento das ligas com efeito memória de forma em atuadores aeronáuticos, analisando suas propriedades mecânicas, ligas mais utilizadas e comercialmente disponíveis. Além disso, como análise futura proveniente destas pesquisas, seria interessante estudar o processo de falha por fadiga dessas ligas quando solicitadas por um longo período de tempo de forma cíclica, como foi proposto e estudado por Casati *et al.* (2011).

Por outro lado, na área de engenharia de controle e automação, estudaram-se os variados métodos de acionamento de LMFs, não somente em atuadores aeronáuticos segundo Oliveira (2015), mas também no controle de dedos robóticos conforme Silva *et al.* (2012). Assim, pode-se pensar em fazer adaptações de alguns desses sistemas para acionamento do flap deste projeto, embora as ferramentas necessárias para tal engenhosidade seja, atualmente, limitada.

Finalizando, na área de engenharia aeronáutica, pode-se averiguar o grau de utilização, eficiência e eficácia de atuadores baseados no efeito memória de forma a fim de realizar a movimentação de superfícies de comando, como os *flaps*. Além disso, observou-se que pesquisas neste ramo estão crescendo rapidamente e novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, não apenas na aplicação “simples” em superfícies de comando, mas também em modificar a estrutura das asas a fim de gerar maior eficiência e adaptação em determinadas situações de voo, como é proposto por Senthilkumar *et al.* (2013) a respeito de “*morphing wings*”, tornando tais estudos nesta área bem atual e promissor.

Os próximos passos, após definido o sistema de acionamento da liga descrito acima, seriam definir o sistema de controle deste acionamento e fazer uma análise da aplicação da LMF em uma aeronave não tripulada, visando obter a melhor integração da LMF à superfície de controle a ser estudada. Todavia, verificou-se a necessidade de investigar primeiro o comportamento do efeito memória de forma do fio de maneira prática e realista a fim de coletar dados e informações sobre este que seriam importantes para melhor modificar e otimizar o sistema de acionamento proposto por Senthilkumar (2012) e desenvolver uma estrutura da asa que atendesse os objetivos do projeto. Assim, somente após este processo de análise comportamental do fio, poderia ser dada sequência aos próximos passos deste trabalho definidos inicialmente. Desta forma, efetuou-se um ensaio mecânico do fio de forma simples para atestar a corrente de ativação do efeito memória de forma, a corrente máxima do fio até o seu rompimento, o tempo máximo que o fio fica sob o EMF sem perder esta propriedade e o deslocamento máximo do fio durante a ativação do EMF. Portanto, uma bancada experimental foi construída, que é mostrada na Fig. 1, e os testes foram realizados.

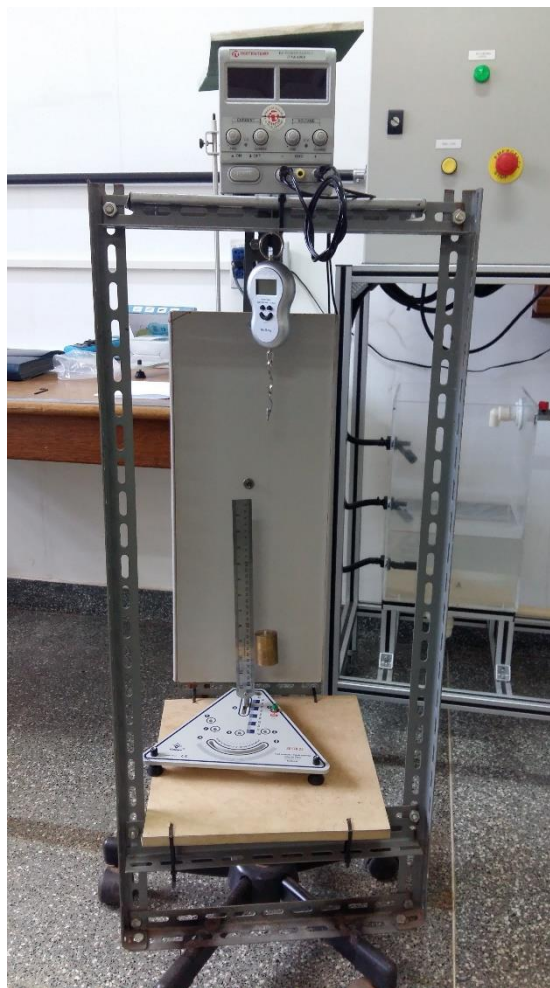


Figura 1 - Bancada experimental para ensaio mecânico do fio de EMF.

Fonte: A autora.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao iniciar este projeto foi proposto o levantamento das ligas comercialmente disponíveis e suas propriedades a fim de verificar quais ligas atenderiam ao objetivo requerido, utilizando como parâmetro de escolha e seleção a viabilidade econômica. Assim, quanto à composição química, optou-se por escolher a liga binária Ni-Ti, mais conhecida como Nitinol, uma vez que é a mais utilizada atualmente para funcionar como atuador devido a suas ótimas propriedades mecânicas, sendo capaz de recuperar grandes valores de deformações conforme os estudos de Casati *et al.* (2011).

Quanto ao formato, a utilização de molas helicoidais de Ni-Ti proposto por Souza *et al.* (2015) pareceu ser engenhoso, porém o seu sistema de acionamento é mais complexo quando comparados com a utilização de fios de Ni-Ti definidos por Senthilkumar (2012) e Coura (2016). Assim, o uso de um fio se tornou vantajoso devido à facilidade de manuseio e de encontrar no mercado, além de contribuir para o desenvolvimento de um sistema de acionamento mais simples e compacto. Portanto, buscando no mercado a liga e o formato que atendesse aos requisitos definidos acima, tem-se por escolhida a liga comercialmente chamada de Flexinol®, que é encontrada em Dynalloy.

Desta forma, definindo estes parâmetros iniciais, cálculos prévios foram feitos para dimensionar o fio a ser utilizado, estipulando valores mínimos para a dimensão do *flap* e considerando as forças requeridas pelo sistema da asa para que a atuação deste seja feita. Assim, a Tab. 1 apresenta as dimensões estabelecidas para a superfície do atuador da aeronave, a modelagem matemática utilizada para calcular o diâmetro necessário do fio e os valores das variáveis necessários para isto.

Tabela 1 - Dados utilizados para cálculos da modelagem matemática.

DADOS GERAIS	
Ângulo do <i>flap</i> (°)	$\theta = 0$ até 90
Ângulo do fio SMA em relação a força F_{ns} (°)	$\alpha = 90 - \theta$
Velocidade do ar 1 (m/s)	$V_{k=1} = 15$
Velocidade do ar 2 (m/s)	$V_{k=2} = 30$
Densidade do ar (kg/m³)	$\rho = 1,3$
Aplicação da força F_n no centro do <i>flap</i> (m)	$D_1 = 0,0075$
Aplicação da força F_{ns} a 1/3 da distância da aplicação de F_n (m)	$D_2 = 0,005$
Comprimento do <i>flap</i> (m)	0,210
Largura do <i>flap</i> (m)	0,015
Área do <i>flap</i> (m²)	$A = 0,00315$
MODELAGEM MATEMÁTICA	
Cálculo da Força Normal no centro do <i>flap</i> (N)	$F_n = \rho * A * V_k^2 * \sin^2(\theta)$
Cálculo da Força normal do fio na distância d_2 (N)	$F_{ns} = (F_n * D_1) / D_2$
Cálculo da componente da Força F_{ns} na direção x (N)	$F_{nst} = F_{ns} * \cos(\alpha)$

Fonte: A autora e Senthilkumar (2012).

Após realizar os cálculos de todas as forças que o fio deve suportar para funcionar como atuador, o gráfico de Força Requerida x Ângulo θ pode ser plotado e é apresentado a seguir na Fig. 2.

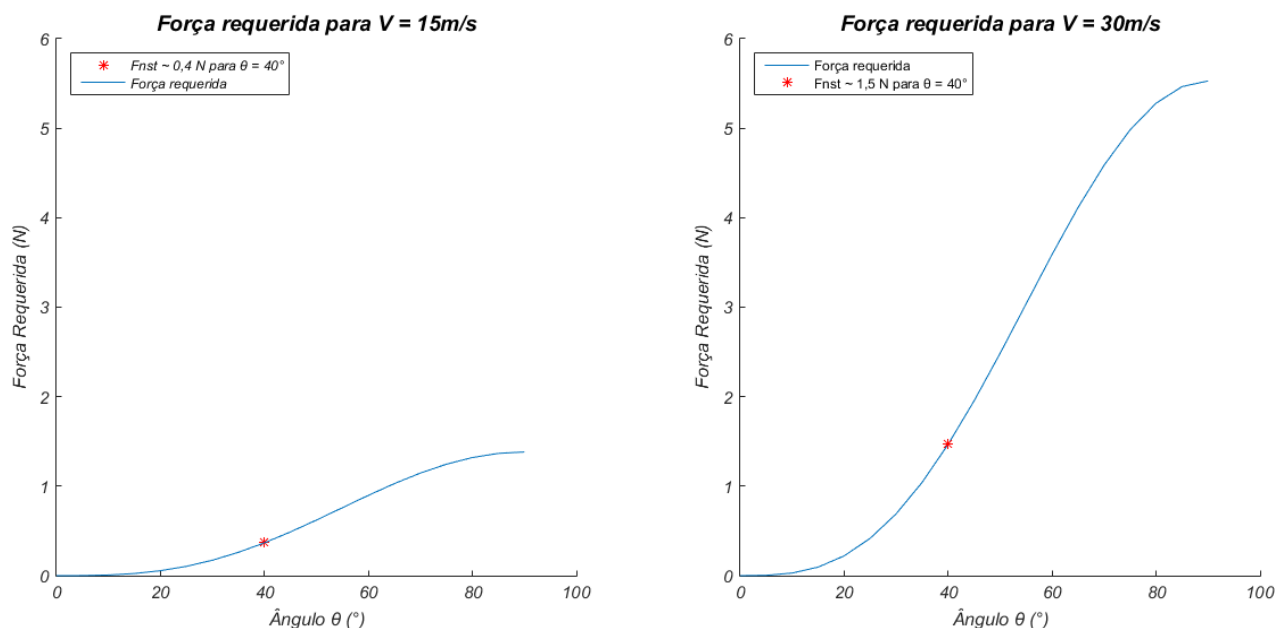


Figura 2 – Gráfico de Força Requerida x Ângulo θ de deflexão do *flap* para velocidade do ar de V_1 e V_2 .

Fonte: A autora.

A partir da análise dos resultados gráficos, pode-se observar que, para um ângulo máximo de deflexão do *flap*, que neste caso foi considerado $\theta = 40^\circ$, a força requerida para as velocidades do ar de V_1 e V_2 foram de 0,4 N e 1,5 N, respectivamente. Assim, avaliando a tabela comercial da empresa Dynalloy, Inc. Copyright® disponível em Dynalloy e considerando a força máxima como sendo no caso extremo de velocidade igual a V_2 , chegou-se no diâmetro ideal de 0,10 mm do fio Flexinol®. Além disso, avaliando a faixa de temperatura de trabalho do fio, definiu-se que a temperatura para atuação do *flap* deve variar em torno de $70^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$, uma vez que não há necessidades de maiores temperaturas para que o fio transforme de fase e acione o seu efeito memória de forma, visto que as temperaturas em que a asa estaria em funcionamento não ultrapassam cerca de 20°C acima da temperatura ambiente.

No que diz respeito ao sistema de acionamento do fio com efeito memória de forma, pesquisou-se na literatura os sistemas que são utilizados na atualidade a fim de otimizar ou adaptá-los. Para tanto, após tais investigações, os parâmetros de facilidade e baixo custo de construção, simplicidade de controle e sistema compacto foram cruciais para definir o sistema de acionamento a ser adotado. Portanto, dentro os sistemas propostos por Souza *et al.* (2015) e Coura (2016), chegou-se na escolha do sistema de acionamento apresentado por Senthilkumar (2012), que atendeu de forma mais completa e direta aos parâmetros descritos anteriormente.

O mecanismo de atuação do fio proposto por Senthilkumar (2012) pode ser observado no desenho esquemático da Fig. 3. Basicamente, o fio é aquecido por meio do efeito Joule gerado a partir da corrente elétrica que passa por este devido a um circuito de controle de chaveamento de uma bateria. Desta maneira, assim que o fio atinge a temperatura de transformação de fase, este contrai e o seu comprimento diminui, fazendo com que o *flap* seja defletido para baixo, no ângulo em que se deseja, e a mola, que se encontra na parte superior da asa, seja alongada. Após o tempo de atuação do *flap*, a corrente elétrica cessa, o fio resfria por meio de convecção e, então, seu comprimento é restabelecido, de modo que o *flap* e a mola retornam para a sua posição inicial.

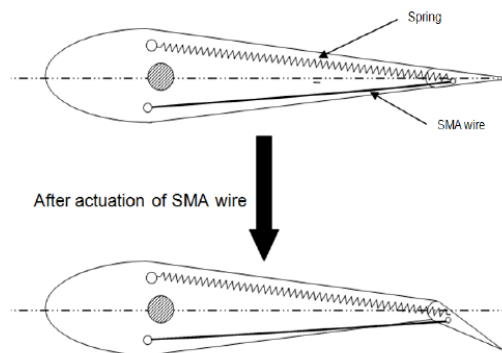


Figura 3 – Mecanismo de funcionamento do *flap* atuado por um fio de memória de forma.

Fonte: Senthilkumar (2012).

Dando continuidade ao projeto, realizou-se a construção de uma bancada experimental para que uma análise comportamental do fio pudesse ser feita. Assim, algumas medições foram realizadas para descobrir qual a corrente máxima de rompimento do fio sob aplicação de um peso constante no fio de 0,165 Kg e os resultados são mostrados na Tab. 2. Além disso, foi medido o deslocamento final do fio antes do seu rompimento, pois foi percebido que a partir de um período em que o fio estava sob ação constante da corrente elétrica, este começava a alongar o seu comprimento de modo a ser maior do que seu comprimento inicial.

Tabela 2 - Ensaio mecânico do fio com massa constante de 0,165 Kg.

ENSAIO FEITO PARA $m_i = 0,165 \text{ Kg.}$									
	i_1 (A)	i_2 (A)	F (kg)	X_1 (m)	X_2 (m)	Rompeu?	L_i (m)	L_f (m)	Aumento (m)
Ensaio 1	0,0	0,6	0,19	0,168	0,18	Sim	0,387	0,399	0,012
Ensaio 2	0,0	0,6	0,17	0,056	0,07	Sim	0,40	0,414	0,014
Ensaio 3	0,0	0,61	0,175	0,095	0,103	Sim	0,40	0,408	0,008
Ensaio 4	0,0	0,61	0,185	0,154	0,164	Sim	0,406	0,416	0,01

Legenda: i_1 = corrente inicial; i_2 = corrente final; F = força medida pelo dinamômetro; X_1 = distancia inicial do fio em i_1 ; X_2 = distância final do fio em i_2 ; L_i = comprimento inicial do fio; L_f = comprimento final do fio; Aumento = representa o aumento de comprimento do fio após cessar a aplicação de corrente ($L_f - L_i$).

Fonte: A autora.

Analisando os resultados, tem-se que o fio rompe, em média, com uma corrente de 0,6 A e que em todos os casos o seu comprimento final foi aumentado em relação ao comprimento inicial. Buscando compreender este comportamento do fio, entende-se que possivelmente o fio sofre deformação plástica e, por causa da sua pouca massa em relação ao peso aplicado, os átomos tendem a se rearranjar, aumentando, assim, o seu comprimento na mesma direção exercida pela força de m_1 , até que o fio se rompa.

Com o intuito de comprovar que a corrente de ativação do efeito memória de forma do fio se dá na aplicação da corrente de 0,2 A informada por Dynalloy, outro ensaio foi feito e verificou-se que de fato é a partir deste valor que o fio contrai e se desloca. Além disso, foi medido o deslocamento do fio durante este ensaio e, em média, obteve-se um deslocamento máximo de 0,0112 m, para m_1 aplicada, e 0,015 m, para m_2 aplicada. Tais resultados são apresentados na Tab. 3 e 4, e a Fig. 4 apresenta o deslocamento do fio em um dos ensaios realizados.

Tabela 3 - Ensaio de corrente de ativação e deslocamento máximo do fio para massa constante de 0,165 Kg.

ENSAIO FEITO PARA $m_1 = 0,165 \text{ Kg.}$					
	$i_1 \text{ (A)}$	$i_2 \text{ (A)}$	$X_1 \text{ (m)}$	$X_2 \text{ (m)}$	Variação (m)
Ensaio 1	0,0	0,2	0,168	0,153	0,015
Ensaio 2	0,0	0,27	0,056	0,047	0,009
Ensaio 3	0,0	0,21	0,15	0,137	0,013
Ensaio 4	0,0	0,21	0,095	0,083	0,012
Ensaio 5	0,0	0,25	0,154	0,147	0,007
	Média $i \text{ (A):}$	0,228		Média $X \text{ (m):}$	0,0112

Legenda: Variação = representa a capacidade do fio de contrair e diminuir seu comprimento final ($X_1 - X_2$).

Fonte: A autora

Tabela 4 - Ensaio de corrente de ativação e deslocamento máximo do fio para massa constante de 0,355 Kg.

ENSAIO FEITO PARA $m_2 = 0,355 \text{ Kg.}$					
	$i_1 \text{ (A)}$	$i_2 \text{ (A)}$	$X_1 \text{ (m)}$	$X_2 \text{ (m)}$	Variação (m)
Ensaio 1	0,0	0,26	0,135	0,12	0,015
Ensaio 2	0,0	0,39	0,135	0,12	0,015
Ensaio 3	0,0	0,49	0,135	0,12	0,015
Ensaio 4	0,0	0,51	0,145	0,13	0,015
	Média $i \text{ (A):}$	0,4125		Média $X \text{ (m):}$	0,015

Fonte: A autora

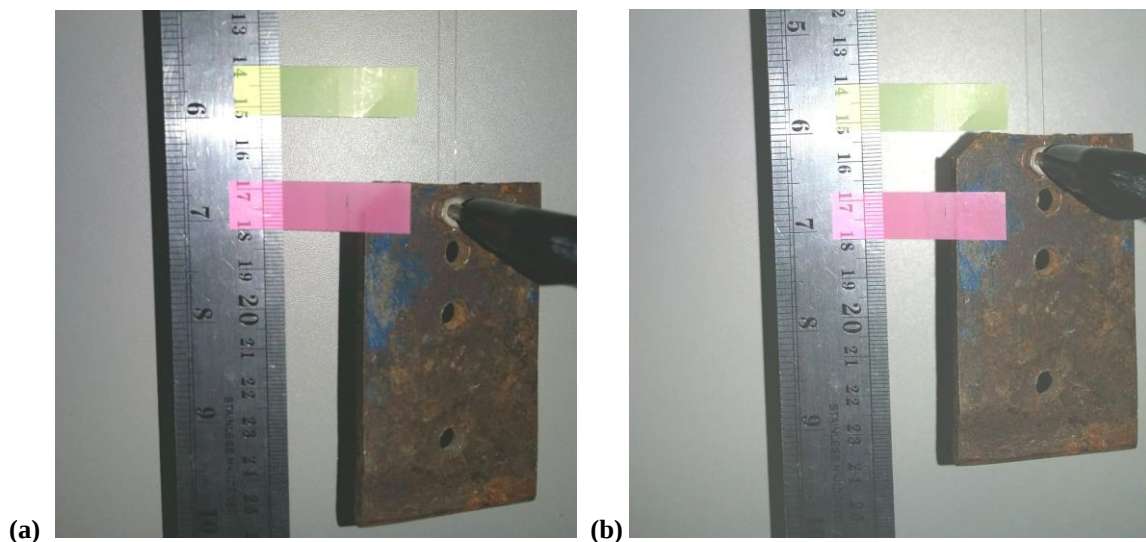


Figura 4 - Ensaio de corrente de ativação e deslocamento máximo do fio para massa constante de m₁. (a) Distância inicial do fio em 0,0 A: X₁ = 0,168 m (b) Distância final do fio em 0,2 A: X₂ = 0,153 m.

Fonte: A autora

Por fim, o fio foi aquecido até próximo de sua corrente máxima de rompimento e deixado nesta condição por um tempo a fim de verificar se ele perderia ou não sua propriedade de EMF. Desta forma, em todas as medições, o fio se deformou plasticamente de modo a aumentar o seu comprimento e em todos os casos, quando a corrente era zerada, o fio não retornava ao seu comprimento inicial. Além disso, após ser zerada a corrente, era aplicada novamente uma corrente de 0,2 A e foi atestado de que o fio não contraía, concluindo, então, que ele perdeu a sua propriedade de EMF após longo período sob efeito de uma corrente próxima de 0,6 A.

Vale ressaltar que a corrente aplicada em cada teste era contínua e seu aumento se dava de forma gradativa, diminuindo os problemas com deformações da microestrutura do material, como foi sugerido por Casati *et al.* (2011). Além disso, observou-se que, devido ao pequeno diâmetro do fio, quando aquecido a uma corrente próxima de seu rompimento, qualquer impacto externo ou força extra aplicada sobre o fio que esteja ligado a sua estrutura já é suficiente para que ele se rompa.

4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que ligas com efeito memória de forma estão sendo amplamente estudadas por ter um grande campo de exploração em suas diversas e incalculáveis áreas de aplicação. Por isso, este trabalho se torna inovador e pretende servir como incentivo para que novas pessoas deem continuidade no desenvolvimento de técnicas que melhorem a sua utilização na aeronáutica.

A utilização de uma liga do sistema binário Ni-Ti se tornou vantajoso por ser amplamente estudado pela comunidade científica, mais barato e menos tóxico do que outras LMFs, além de suas excelentes propriedades: resistência mecânica, razoável deformação recuperável e resistência à corrosão. Além disso, escolher utilizar a liga em formato de um fio pareceu ser a escolha mais simples, pois facilita o desenvolvimento de um sistema de acionamento compacto e menos complexo.

Efetuando o ensaio mecânico, pode-se entender melhor o comportamento do fio, além de comprovar que a corrente de seu acionamento do EMF de fato é a mesma informada pelo fabricante. Além disso, ao realizar os testes, descobriu-se que a corrente máxima que o fio rompe sob efeito de uma massa constante é de 0,6 A e que o seu deslocamento máximo quando ativado pela corrente de 0,2 A é, em média, de 0,0112 m, para uma massa de 0,165 Kg, e 0,015 m, para uma massa de 0,355 Kg.

Em todos os casos em que o fio foi submetido a uma corrente próxima a sua corrente de rompimento ou foi submetido a uma corrente constante por um longo período de tempo, o seu comprimento final foi aumentado em relação ao comprimento inicial. Este comportamento do fio pode ser justificado por meio da possível deformação plástica sofrida por este material até o seu rompimento. Além disso, nestas mesmas condições, entende-se que qualquer impacto externo ou força extra aplicada sobre o fio, que podem ser representados na realidade, por exemplo, por uma turbulência sofrida pelo VANT durante um voo, já é suficiente para que o fio se rompa. Portanto, cuidados práticos referentes a estas condições descritas a cima devem ser levados em considerações.

Por outro lado, pode-se entender que o fio perde a sua propriedade de EMF quando submetido a uma mesma corrente, abaixo da de rompimento, em um longo período de tempo e que, portanto, torna-se interessante que o seu uso seja dado quando não necessite de aplicação contínua e constante de corrente elétrica por um grande tempo. Assim, isto proporciona ter um novo olhar para o desenvolvimento de uma asa e de um sistema de acionamento deste fio, de forma a evitar que ele perca sua propriedade EMF ou se rompa no meio de sua aplicação. Todavia, entende-se que neste aspecto, estudos mais aprofundados sejam necessários para investigar o seu comportamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Mato Grosso e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC)/CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

6. REFERÊNCIAS

- Azom, "Shape Memory Alloys", Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1744>>, Acesso em: 30/08/2017.
- Bhattacharya, K., 2003, "Microstructure of martensite: why it forms and how it gives rise to the shape-memory effect", In: Oxford series on materials modeling, Oxford University Press, New York, USA, cap. 1, 288 p.
- Buehler, W. J.; Wiley, R. C.; Gilfrich, J. V., 1963, "Effect of low-temperature phase changes on mechanical properties of alloys near composition TiNi", Journal of Applied Physics, v. 34, n. 5, p. 1475-&.

- Casati, R. ; Passaretti, F. ; Tuissi, A., 2011, "Effect of electrical heating conditions on functional fatigue of thin NiTi wire for shape memory actuators", National Research Council - Institute For Energetics And Interphases (CNR-IENI), Corso Promessi Sposi, 29 Lecco: Elsevier, Italy.
- Castilho, W. S.; Silva, E. P., 2011, "Algumas aplicações das ligas com memória de forma", Sinergia (CEFET/SP), v. 12, p. 99. Disponível em: <http://www.cefetsp.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia_2011_n1/pdf_s/segmentos/artigo_11_v12_n1.pdf>, Acesso em: 30/04/2017.
- Coura, E.A.N., 2016, "Estudo da aplicação da liga NiTi com efeito memória de forma em atuadores de aeronaves", Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas (Engenharia de Estruturas) -Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.
- Duerig, T. W., 1990, "Applications of shape memory", Materials Science Forum, v. 56-58, p. 679-691.
- Dynalloy, Inc., "Technical characteristics of Flexinol® actuator wires", Disponível em: <<http://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>>, Acesso em: 18/11/2016.
- Dynalloy, Inc., Disponível em: <http://www.dynalloy.com/flexwire_70_90.php>, Acesso em: 18/11/2016.
- Fernandes, F. M. B., 2003, "Ligas com memória de forma", Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Hartl, D.; Lagoydas, D.C., 2007, "Aerospace applications of shape memory alloys", In: Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 535-552 p.
- Hoi-Yin, S., "The characteristics and applications of SMA", Disponível em: <http://www.hk-physics.org/iq/memory_alloy/memory_alloy_e.html>, Acesso em: 29/08/2017.
- Huang, W., 1998, "Shape memory alloys and their application to actuators for deployable structures", 175 f. (Tese de doutorado) – Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, England.
- Jardine, P.; Flanigan, J.; Martin, C., 1997, "Smart wing shape memory alloy actuator design and performance", In: SPIE, 48-55 p.
- Lin, R., "Shape Memory Alloys", Disponível em: <<http://www.stanford.edu/~richlin1/sa/sma.html>>, Acesso em: 29/08/2017.
- Magalhães, M. A. R. D., 2015, "Veículos aéreos não tripulados. Questões legais relativas ao emprego em ações de defesa e de segurança", 44 f. Monografia (General) – Curso de Promoção d Oficial General, Instituto de Estudos Superiores Militares, Pedrouços, Brasil.
- Medeiros, F. A. et al., 2008, "Utilização de um veículo aéreo não-tripulado em atividades de imageamento georeferenciado", Ciência Rural, v. 38, n. 8, p. 2375-2378.
- Melzer, A.; Stöckel, D., 1995, "Using shape memory alloys", Medical Device Technology.
- Ölander, A., 1932, "An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys", Journal of the American Chemical Society, v. 54, n. 10, p. 3819–3833.
- Oliveira, S., 2015, "Caracterização e desenvolvimento de um atuador de força utilizando material memória de forma", Dissertação de mestrado para obtenção do Grau de Mestre, Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
- Patoor, E. et al., 2006, "Shape memory alloys, part I: general properties and modeling of single crystals", Mechanics of Materials, v. 38, n. 5-6, p. 391-429.
- Rasi, J. R., 2008, "Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em pulverização agrícola", 70 f. Monografia (Especialista em Gerenciamento e Utilização de Máquinas Agrícolas) – Pós-graduação em Engenharia Rural, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil.
- SAE Brasil, "SAE Brasil Aerodesign", Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>>, Acesso em: 01/04/2016.
- Senthilkumar, M., 2012, "Analysis of SMA Actuated Plain Flap Wing", Dept. of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore 641 004, India.
- Senthilkumar, P. et al., 2013, "Development and wind tunnel evaluation of a shape memory alloy based trim tab actuator for a civil aircraft", Centre For Societal Missions & Special Technologies, CSIR-National Aerospace Laboratories, Smart Materials And Structures.
- Silva, A.F.C. et al., 2012, "Sistema de controle fuzzy aplicado a um dedo robótico acionado por ligas com memória de forma", Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, Cidade Universitária, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
- Silva, A.F.C. et al., 2012, "Dedo biométrico artificial acionado por liga com memória de forma", Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
- Souza, L.M.C.; Rigoto Filho, M.A.; Leão Neto, W.C.C., 2015, "Acionamento de Flaps de um Aeromodelo por meio de Molas com Comportamento de Memória de Forma", Trabalho Acadêmico de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Van Humbeeck, J.; Chandrasekaran, M.; Delaey, L., 1991, "Shape memory alloys - materials in action", Endeavour, v. 15, n. 4, p. 148-154.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

SHAPE MEMORY ALLOYS STUDIES TO USE IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

Mayara Auxiliadora Castilho Benites, mayabenites@gmail.com¹

João Gabriel Benedito Duarte, joaogpix@gmail.com¹

Edson Godoy, godoy.edson@hotmail.com¹

Marcia Moreira Medeiros, marciam.medeiros@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso, Avenida dos estudantes, número 5055, Bairro Cidade Universitária, Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil, CEP 78736900

Abstract. *Shape memory alloys (SMA) have been extensively studied both in terms of microstructural analysis and mechanical properties as well as in the research and development of applications. Thus, knowing that they have the capacity to recover their original shape from the thermomechanical loads application, studies were made to understand alloys behavior and to evaluate the possibility of using SMA in aircraft as Unmanned Aerial Vehicles (UAV). In order to optimize and simplify some aircraft systems for the purpose of improving the performance / weight ratio, it is advantageous to replace the mechanical servo and hydraulic systems with the SMA, which will function as aircraft actuators. As a means of achieving this, the activation alloy system was studied and the material to be used for these application was analyzed in order to its shape, size, chemical composition and other parameters. Therefore, this work intend to investigate and evaluate the application of shape memory alloys in small unmanned aerial vehicles as well as to perform the mechanical test of this alloy in order to ascertain its behavior in response to the application of an electric current. Thus, the commercially available alloys and their properties and characteristics were raised by analyzing and ranking those that would have use potential for the application in order to the economic viability of each league of interest. Concomitantly with this study, previous calculations were made to verify the required force that each wire of this alloy should withstand to operate as actuator. After such analyzes, the alloy composed of nickel-titanium was chosen, which is commercially recognized by Flexinol®. In addition, understanding and selecting some types of existing shape memory effect (SME) wiring systems that are used in aeronautics has become interesting. Finally, investigating the behavior of the wire, it was thought to carry out a mechanical test of the SMA to attest the activation current of the SME, the maximum current of the wire until its fracture, the maximum time that the wire stays under the SME without losing this property and maximum wire displacement during SME activation. An experimental bench was built and tests were performed. By performing the mechanical test, the wire behavior was better understood as well as verifying that the activation current of SME is in fact the same as reported by the manufacturer. In addition, in performing the mechanical test, it was found that the maximum current that the wire fracture under the effect of a constant mass is 0.6 A and that the maximum wire displacement is 0.0132 m on average when activated by the current of 0.2 A. On the other hand, it can be understood that the wire loses its SME property when subjected to the same current, wich is in below fracture current, over a long period of time and that, therefore, it becomes interesting that its use is given when it does not require continuous and constant electric current application for a large period of time. In this way, this provides a new look at the development of a drive system of this wire in order to prevent it from losing its SME property or fract in the middle of its application. However, it is understood that in this respect further studies are needed to investigate this behavior.*

Keywords: *shape memory alloys, unmanned aerial vehicles, mechanical tests.*