



PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA EM PRÓTESES

SANTOS, Christian Mariani Lucas

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - E-mail: cmls1@bol.com.br

DYNNIKOV, Vladimir Ivanovitch

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - E-mail: dynnikov@npd.ufes.br - UFES.

***Resumo.** O aperfeiçoamento de ligas monocristalinas Cu-Al-Ni ampliou o horizonte de aplicação para ligas de memória de forma. O aumento significativo de número de ciclos sem deformação plástica residual e uma maior deformação linear, ajudam na criação de novos tipos de atuadores em várias áreas da Engenharia que poderiam ser usados inclusive em próteses. Uma caracterização detalhada torna-se necessária para avaliar as perspectivas de aplicação da referida liga citada. Os métodos de aquecimento por resistência elétrica estão em foco neste trabalho.*

***Palavras chave:** shape memory alloy, monocristal, métodos de aquecimento*

1. INTRODUÇÃO

As Ligas de Memória de Forma (Shape Memory Alloy) caracterizam-se pelo efeito de memória de forma (EMF) quando uma amostra previamente deformada nas temperaturas abaixo de A_s retorna ao estado anterior sob aquecimento acima da temperatura A_f , e pelo efeito de pseudo elasticidade quando a deformação obtida nas temperaturas acima de A_f desaparece após a retirada da carga que provocou esta deformação. Entende-se que A_s é a temperatura do início do processo de formação da austenita e A_f é a temperatura do final desta transformação. É importante que ambos efeitos estejam acompanhados pela transformação reversiva da estrutura cristalográfica (Otsuka, 1990).

Apesar da resistividade da estrutura, as Ligas de Memória de Forma (LMF) caracterizam-se pela histerese na deformação que varia significativamente dependendo do tipo de liga.

A primeira observação dos efeitos citados foi registrada por Chang e Read em 1932 (Hodgson, 1999). Eles notaram a reversibilidade da transformação em liga de Au-Cd por observações metalográficas e **mudanças de resistividade elétrica**. Em 1938, a transformação foi observada em ligas de Cu-Zn. Entretanto, somente em 1962, Buehler e seus colaboradores descobriram o efeito semelhante em ligas Ni-Ti equiatômico. Nos dez anos seguintes um número considerável de produtos comerciais já estavam no mercado, pois a LMF a base de Ni-Ti mostrou uma boa ductilidade devido ao seu tamanho de grão reduzido em duas vezes comparando com LMFs a base de cobre, cujo EMF foi descoberto em 1970. A resistência elétrica e contra corrosão de LMF a base de Ni-Ti são importantes para uso prático. Embora as LMF a base de Ni-Ti apresentem alto custo em comparação com as ligas a base de cobre, entre as quais destacam-se as composições de Cu-Al-Zn e Cu-Al-Ni, esta última apresenta melhores propriedades mecânicas tais como módulo de Young, alongamento proporcional e tensão máxima de alongamento.

Entretanto, todos os pesquisadores relataram a importância do tempo de uso, de temperatura, dos níveis de tensão e deformação além da quantidade de ciclos para o uso da LMF.

A aplicação de LMF a base de Cu-Al policristalina ficou limitada devido as suas características precárias. Porém, o lançamento de LMF a base de Cu-Al-Ni monocristalinas de comprimento dos cristais de até 600 mm e com capacidade de fabricação em escala comercial, tornou-a competitiva com LMF a base de Ni-Ti. A Tab. (1) expõe resultados interessantes de comparação e demonstra as novas propriedades das LMF a base de Cu-Al-Ni monocristalinas, contraditórias a algumas conclusões obtidas anteriormente (Otsuka, 1990). A explicação desta diferença talvez possam ser dada considerando o tamanho dos cristais.

Tabela 1. Dados comparativos de deformação e tensão entre LMF.

Número de ciclos	Ni-Ti		Cu-Al-Ni (policristalina)		Cu-Al-Ni (monocristalina)	
	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)
1	8	400	5	200	8	450
10 ²	4	250	2,5	100	8	400
10 ³					8	250
10 ⁴	2	140	1,5	70	4	150
10 ⁵	1	100	0,8	40		

O objetivo final dos autores deste artigo é a aplicação de atuadores a base de LMFs monocristalinas em próteses. Alguns autores (Soares et al, 1997) já exploraram esta área de aplicação. Foi apresentado um dispositivo protético para crianças, como uma ferramenta de treino para proporcionar melhores adaptações às próteses futuras. O dispositivo é acionado por um atuador composto de 9 fios de Ni-Ti com abertura máxima da garra de até 24 mm. Porém, foram usadas as LMF a base de Ni-Ti das quais as propriedades foram superadas pelas ligas a base Cu-Al-Ni monocristalinas.

A metodologia do projeto de atuadores a base de LMF Cu-Al-Ni monocristalina e as vantagens dessas construções em relação aos atuadores de Ni-Ti e Cu-Al-Ni policristalinos foi abordada anteriormente por Priadko (1997). As novas propriedades descobertas pelos autores da nova tecnologia resultaram na criação de atuadores e garras a base de LMF de Cu-Al-Ni monocristalinas (Priadko, 2000; Viahhi, 2000).

O desenvolvimento de um atuador a base LMF para aplicação em próteses também requer uma certa dinâmica que depende de alguma forma de aquecimento.

Este trabalho está voltado para uma avaliação das condições nas quais pode-se tornar possível a aplicação dos atuadores a base de LMF monocristalinas em próteses. A busca de caminhos para uma forma de aquecimento alternativo em ligas de Cu-Al-Ni monocristalinas está em foco neste artigo, analisando a composição química, as condições de aquecimento elétrico e o comportamento mecânico.

2. ANÁLISE DE AMOSTRAS DE LMF's MONOCRISTALINAS

Considerando a importância da presença de ótimos condutores elétricos como o Cu e o Al em LMF a base de Cu-Al-Ni monocristalinas, foi executado uma análise de composição química de amostras desenvolvidas pelo Instituto de Robótica e Cibernética de St. Petersburg (Rússia).

Segundo Hodgson (1999), as composições de LMF policristalinas de Cu-Al-Ni geralmente contém em torno de 11 a 14,5% em massa de alumínio e 3 a 5% em massa de níquel. Esta porcentagem de Al é fundamental para garantir a transformação cristalográfica reversiva (Otsuka, 1999). Com estes teores, as LMF apresentam uma resistividade elétrica de 11 a 13 $\mu\Omega$ -cm. Este valor é, aproximadamente, sete vezes maior do que a resistividade elétrica do cobre puro (1,7

$\mu\Omega\cdot\text{cm}$). Os metais puros têm uma estrutura cristalina perfeita, o que reduz a sua resistividade (Schmidt, 1979).

Em relação as ligas de Cu-Al-Ni monocristalinas, é importante saber seus teores para uma avaliação prévia da condutividade elétrica e térmica do material. A análise de composição química realizada no Laboratório de Metalurgia Física da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) é apresentada na Tab. (2).

Tabela 2. Resultado da análise química das amostras de LMF.

Elemento	Amostra Superelástica (Austenita)		Amostra Dúctil (Martensita)	
	% em massa	% atômica	% em massa	% atômica
Cobre	83,29	72,15	86,13	75,60
Alumínio	10,96	22,36	10,04	20,76
Níquel	3,58	3,35	3,83	3,64
Ferro	2,17	2,14	--	--
Total	100	100	100	100

Os teores de Cu apresentam-se acima de 80% em massa, e teores de Al um pouco abaixo dos valores relatados em bibliografia para LMF policristalinas. Os teores de Cu encontrados nesta análise indicam também, uma baixa resistividade elétrica para LMF deste tipo. Porém, a presença de outros componentes na composição diminui a influência de Cu. Tal fato é devido a alterações na disposição cristalina do produto resultante, cuja irregularidade dificulta a passagem dos elétrons.

Observa-se a presença fundamental do Fe em amostras superelásticas. Apesar da porcentagem pequena, ele permite deslocar a malha da histerese para uma temperatura ambiente.

A baixa resistência das LMF mencionadas envolve uma pesquisa de condições de aquecimento.

3. ESTUDO DE CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO

Estudos publicados (Araújo et al, 1999) compararam um “atuador térmico” (aquecimento do fio por convecção em um banho de óleo de silicone) e um “atuador elétrico” (aquecimento do fio por efeito Joule) e comprovaram a concepção de um atuador relativamente simples utilizando fios finos de uma LMF a base de Ti-Ni-Cu. Foi demonstrada, experimentalmente, a diferença de desempenho para os dois casos. Apesar do aumento das taxas de deformação de 1,2 % no caso do “atuador térmico”, o tempo de sua reação foi aproximadamente duas vezes maior do que no “atuador elétrico”. Esta conclusão indicou o caminho para obtenção da melhor dinâmica da prótese.

Além de tudo, a utilização de um “atuador térmico” em próteses torna-se difícil pela sua realização. Enquanto um “atuador elétrico” seria prático e de fácil construção. Outrossim, uma corrente de até 8A para uma deformação de 4,8% (Araújo et al, 1999) é muito alta para próteses portáteis que usam baterias portáteis como fonte de energia.

Como os valores de resistividade de LMFs monocristalinas não foram encontrados na bibliografia, eles foram avaliados experimentalmente. As dimensões das LMF testadas apresentam-se na Tab. (3).

Tabela 3. Dimensões das LMF monocristalinas utilizados nas medições elétricas.

Amostras (codificação)	Comprimento (mm)	Seção (mm)	Área da Seção (mm^2)
Cu-Al-Ni superelástico (A1)	202,65	0,88	0,608
Cu-Al-Ni superelástico (A2)	141,08	1,99	3,110

Para um cálculo prévio, utilizando a resistividade elétrica de $12 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, pode-se perceber a baixa

resistência das amostras, cerca de $4 \cdot 10^{-2} \Omega$ para A1 e $5,44 \cdot 10^{-3} \Omega$ para A2. Os resultados das medições estão apresentados na Tab. (4).

Tabela 4. Resistividade das amostras de Cu-Al-Ni.

Amostras (codificação)	Resistência medida (Ohm)	Resistividade calculada ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
Cu-Al-Ni superelástico (A1)	0,0504	15,47
Cu-Al-Ni superelástico (A2)	0,0076	17,14

A resistividade calculada da Tab. (4) foi obtida através dos dados da Tab. (3), da resistência medida e do comportamento linear previsto pela lei de Ohm,

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (1)$$

onde

R = resistência elétrica (em Ω)

ρ = resistividade elétrica do material (em $\Omega \cdot \text{cm}$)

L = comprimento do corpo condutor (em cm)

A = seção transversal (em cm^2).

Considerando o baixo nível dos valores obtidos, foi avaliada a opção do aumento da resistência elétrica sem alteração da composição química. Segundo as Leis da Física, a corrente elétrica passa pela superfície e, quando existe um contato entre duas peças, a corrente usa contatos pontuais desta superfície. Criando uma camada flexível externa por cima da LMF, além de uma opção para aquecimento térmico, seria possível aumentar a resistência na somatória do conjunto (Schmidt, 1979).

A Fig. (1) mostra o circuito montado para teste e avaliação da resistência e a Fig. (2) os resultados obtidos.

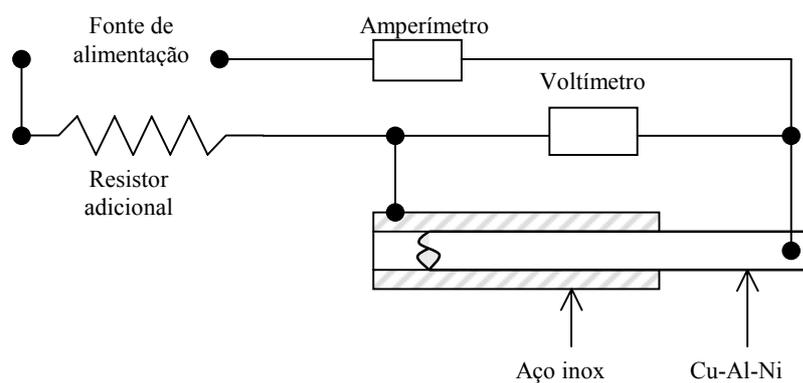


Figura 1. Circuito para medição de peças em contato.

Em 100 % de contato a LMF está totalmente acoplada. Quando se reduziu a superfície de contato, a resistência aumenta devido aos poucos pontos que proporcionam a área de passagem da corrente. Desenvolvendo esta idéia, foi aplicada uma camada de óxido de cromo na superfície do aço inoxidável o que contribui para o aumento da resistência elétrica devido a forte rugosidade de superfície cromada resultante. No final, em experimentos, foi obtido o aumento resultante da

resistência elétrica do conjunto em até três vezes, comparando-se com a resistência da LMF Cu-Al-Ni sem camada. A propósito, nas experiências foi usada uma camada simples de aço inox, enquanto existem várias ligas especificamente dedicadas para aquecimento, como por exemplo, as ligas de Cr-Al-Fe com sua resistividade em torno de $140 \mu\Omega\cdot\text{cm}$.

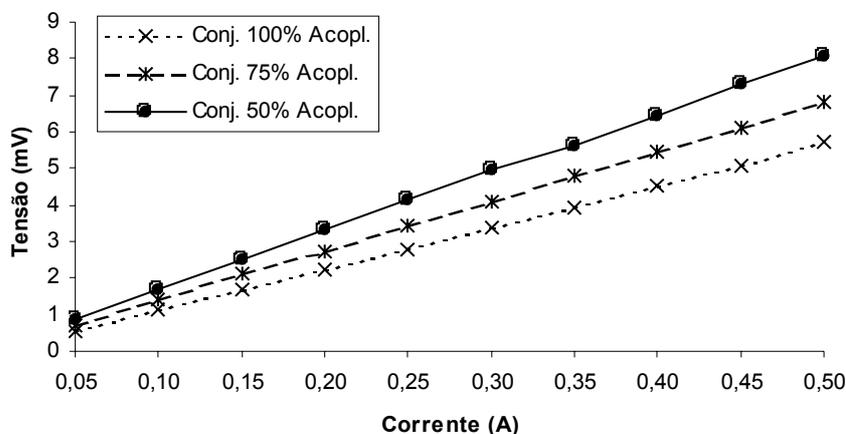


Figura 2. Medidas elétricas nos conjuntos acoplados de aço inoxidável e LMF.

O aumento visível da resistência elétrica resultante demonstrou a possibilidade de trabalhar com "atuador elétrico", o qual oferecerá a melhor dinâmica de próteses.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO MECANISMO PARA LMFs

Para o aquecimento de uma LMF a base de Cu-Al-Ni monocristalina, utilizou-se uma resistência de aquecimento de Ni-Cr acoplada na forma de espiral em torno da referida LMF. Em sucessivos aquecimentos da LMF por efeito Joule, foram observadas velocidades diferenciadas do desenvolvimento do EMF conforme a variação da corrente para o aquecimento da resistência. Ao curvar a LMF formando um ângulo de 180° , observou-se que para correntes elétricas em torno de 0,50 a 0,70 Ampères a LMF iniciava o EMF e após algum tempo o processo cessava e a liga ficava parcialmente curvada, mesmo com a fonte de corrente elétrica ligada. Supõe-se que o calor fornecido pelo aquecimento não era suficiente para o desenvolver de toda a liga, e as trocas de calor com o ambiente tornavam-se significativas já que o conjunto estava exposto ao ambiente do laboratório.

Quando o aquecimento ocorria com uma corrente de 0,50 Ampères e após cessar o EMF, a corrente elétrica foi elevada para 1,0 Ampère, o EMF foi retomado com uma velocidade superior a inicial. Notou-se também, um dispêndio variando de 1,5 a 2,5 minutos ao aplicar a corrente de 1,0 Ampère partindo de uma temperatura ambiente para o aquecimento de toda a LMF até A_f .

Diante das observações, idealizou-se um atuador para permitir o pré-aquecimento da LMF próximo a A_s e que mantivesse esta temperatura, com o mínimo de energia possível. No ato de uma ação que possa requerer força, um aquecimento final seria realizado com o aumento da corrente elétrica para aquecimento. Após o EMF estacionar ou atingir um ponto determinado, uma corrente elétrica final e superior a inicial, faz a LMF tracionar uma massa até atingir uma temperatura próxima de A_f .

Para testar a idéia de pré-aquecimento, montou-se um aparato no Laboratório do Núcleo de Análise de Transporte na Atmosfera (LABINATA) no Centro Tecnológico da UFES, como mostra a Fig. (3).

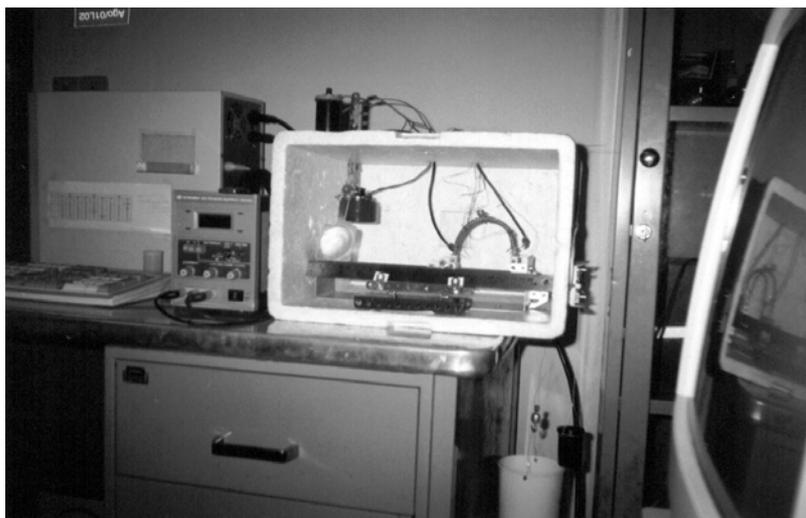


Figura 3. Fotografia do aparato montado para testes.

Para evitar a interferência do meio externo e simular um ambiente fechado para a alocação do atuador, os testes foram realizados dentro de uma caixa de isopor. Dentro do isopor foi montado um atuador com uma LMF, a qual apresentava dimensões de 3,98 mm de diâmetro e 194,52 mm de comprimento, e era aquecida através de duas resistências elétricas de Ni-Cr 80-20 BS28 com $4,7 \Omega$ cada, que envolvia a liga e a isolava eletricamente por uma camada fina de fibra de vidro.

Dois estágios foram estudados. O primeiro consistia em pré-aquecer a LMF a partir de um Marco zero (M_0) previamente definido, no qual a liga ficava flexionada formando um ângulo de 75° entre suas extremidades. Uma das pontas ficava permanentemente fixa enquanto a outra estava apoiada sobre um carro móvel para permitir o EMF. Durante o pré-aquecimento foram utilizadas correntes de 0,70, 0,75 e 0,80 Ampères na resistência de aquecimento enquanto eram monitoradas as temperaturas e a velocidade média de deslocamento da extremidade móvel da LMF. As temperaturas foram controladas através de termopares em sete pontos: três pontos na LMF; dois pontos na resistência de aquecimento; um ponto no interior da caixa de isopor; e um ponto no ambiente externo a caixa. A extremidade da LMF que se deslocava, movia um pequeno carro apoiado sobre guias que tracionava um suporte e uma pequena massa para mover um sensor de deslocamento. Para ajustar todo o conjunto foi utilizada uma massa de 100 g. As observações eram feitas até a LMF atingir o Marco 1 (M_1) da guia, que estava a 40 mm do M_0 .

No segundo estágio, ao atingir M_1 , a resistência de aquecimento recebia uma corrente final de 1,0, 1,2 ou 1,4 Ampères, aumentando assim a temperatura da LMF, provocando um deslocamento mais rápido e com maior força. O suporte para as massas era carregado e media-se o tempo para efetuar este carregamento. A LMF tracionava o suporte com as massas até atingir o Marco 2 (M_2) da guia, distante 30 mm de M_1 , quando a corrente era cessada. Neste período também foram monitoradas as temperaturas e a velocidade média de deslocamento.

As distâncias M_0 , M_1 , e M_2 foram previamente estudadas. O intervalo entre M_0 e M_1 (40 mm) permite o pré-aquecimento do EMF e o intervalo entre M_1 e M_2 (30 mm) permite a atuação da garra, sendo que este intervalo é um boa referência para próteses comerciais de mão existentes no mercado, onde o deslocamento do eixo central para a abertura e o fechamento total da prótese é de 20 mm.

Foram avaliados: temperatura inicial de pré-aquecimento, velocidade de pré-aquecimento e temperatura final de pré-aquecimento.

A temperatura inicial de pré-aquecimento variou na faixa de 22 a 42°C , sendo que neste intervalo não houve interferência desta temperatura no desempenho do pré-aquecimento. Observa-se que a temperatura ambiente, em geral, enquadra-se neste intervalo.

Para tracionar uma massa suspensa, foram avaliados: tempo para carregamento, velocidade do aquecimento final, temperatura final e tempo para a temperatura final.

5. RESULTADOS

O protótipo desenvolvido para estudar um atuador de LMF mostrou a eficiência do pré-aquecimento na LMF que melhorou o desempenho do atuador na resposta.

A velocidade de pré-aquecimento, apesar de apresenta-se homogênea para as correntes de pré-aquecimento de 0,70, 0,75 e 0,80 Ampères, apresentou uma diferença estatística relevante nos dados. Atribui-se a corrente de 0,70 Ampères o melhor meio de pré-aquecer sem consumir energia demasiada. A velocidade do aquecimento final tem um melhor desempenho com correntes finais maiores (1,4 Ampères) e o uso de correntes iniciais menores (0,70 Ampères) não influencia nos resultados finais.

Foi relatada a importância da temperatura final de pré-aquecimento para definir os parâmetros da temperatura de A_s . Assim, a corrente inicial de pré-aquecimento não deve proporcionar um aquecimento que ultrapasse A_s e provoque o EMF sem interagir com a carga a ser tracionada. O pré-aquecimento com a corrente elétrica de 0,70 Ampères apresentou-se satisfatório nos resultados da temperatura final de pré-aquecimento.

A Fig. (4) mostra o tempo para o carregamento em função da massa a ser suspensa.

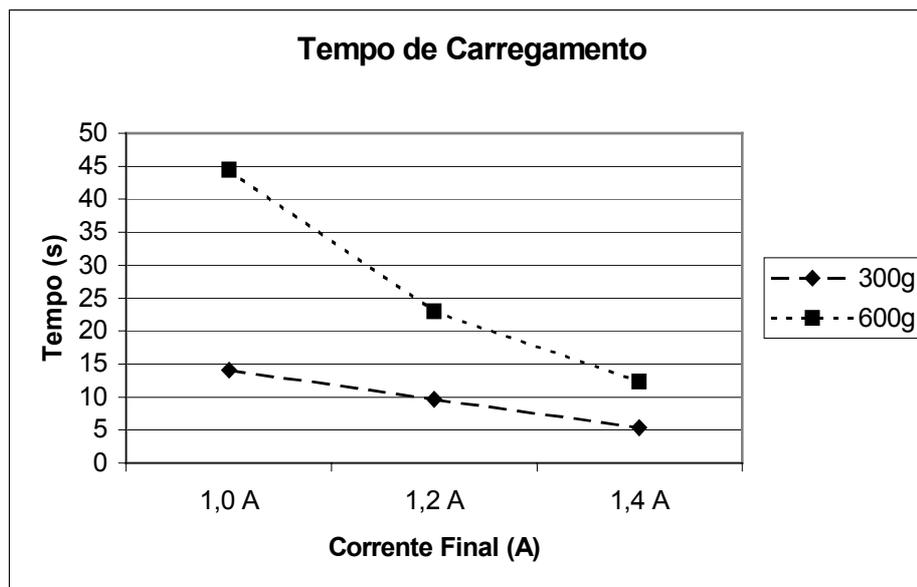


Figura 4. Resultados dos tempos para interação com a massa.

Nas duas massas utilizadas observou-se um tempo de 5 a 15 segundos para a massa de 300 gramas e de 12 a 45 segundos para a massa de 600 gramas. De acordo com o projeto estatístico fatorial, não há interferência da corrente de pré-aquecimento para os resultados obtidos, o que nos permite utilizar este método para deduzir o tempo de interação sem influenciar nos resultados do aquecimento final. Em uma projeção linear dos dados da Fig. (4), estima-se que com uma corrente final de 1,6 Ampères seria possível atingir o tempo ideal de interação de 1 segundo, conforme o projeto proposto por Pons (1999). Esta corrente não foi aplicada por questão de preservação das amostras

A temperatura final é fortemente influenciada pela massa do carregamento e torna-se um ponto a ser observado para a construção da prótese, já que com grandes massas pode-se obter temperaturas elevadas e danos à LMF.

O tempo para a temperatura final é influenciado por todas as variáveis, principalmente pela corrente final e a massa. A corrente inicial contribui pouco para a redução do tempo mas não é descartada ao longo de todo o processo de aquecimento.

6. CONCLUSÃO

No artigo foi abordado o aspecto do uso de LMF a base de Cu-Al-Ni monocristalinas em próteses.

A análise da composição química das amostras disponíveis mostrou os altos teores de Cu e de Al, o que resultou em baixa resistividade elétrica. Seria interessante nos futuros trabalhos analisar o comportamento do conjunto "LMF martensita - LMF austenita", pois a perda da rigidez mecânica pela parte martensítica no pré-aquecimento, pode ser compensada pelo aumento da rigidez pela parte austenita. Como foi visto, o Fe na composição química permite uma fácil alteração para avaliar estas condições.

A baixa resistividade elétrica da LMF dificultou o uso do efeito Joule para aquecimento apesar que somente este efeito garante uma reação do atuador a base de LMF. Para contornar o problema, foram realizados testes com camadas de cobertura. Os resultados melhoraram as perspectivas de aplicação de LMF a base de Cu-Al-Ni monocristalinas em próteses.

Como compromisso prático pode ser usada uma camada de espiras de Ni-Cr sem isolamento no lugar do aço inox testado. A melhora significativa da resistência elétrica total seria com o uso de uma camada fina isolante.

O aproveitamento da camada de óxido de Al que aparece naturalmente dentro do processo de oxidação de ligas torna-se improvável por causa da sua fragilidade num atuador dinâmico. Uma camada isolante feita de polímeros seria uma alternativa, porém, necessita de uma pesquisa profunda que pode ser feita em futuros trabalhos.

Em testes realizados com protótipo do atuador a base de LMF monocristal foi avaliado o seu desempenho. Foi relatada a importância do pré-aquecimento devido a um degrau significativo na histerese da LMF avaliada.

Apesar da necessidade das correntes elevadas desejadas para pré-aquecimento e aquecimento final usadas no protótipo do atuador, a sua aplicação em próteses de braço pode ser realizada através de uma fonte externa praticada pelos fabricantes de próteses funcionais para executar um trabalho elaborado.

7. REFERÊNCIAS

- Araújo, C. J. E Morin, M., 1999, "Comparação Entre as Respostas Elétrica e Térmica de Fios Atuadores com Efeito Memória de Forma", XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Linóia, S.Paulo, Brasil.
- Priadko, A. E Viahhi I., 1997, "Actuators and Drives Based on Cu-Al-Ni Shape Memory Single Crystals", Institute of Robotics and Technical Cybernetics, Russia.
- Priadko, A. et al, Actuators based on Cu-Al-Ni single crystals. SMST-2000: Proceedings of the Third International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California, USA, 2000
- Viahhi, I. et al, Adaptive gripped based on shepe memory actuators. SMST-2000: Proceedings of the Third International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California, USA, 2000
- Hodgson, D. E., Wu, M.H. e Biermann, R.J., 1999, "Shape Memory Alloys", web site: www.sma-inc.com.
- Otsuka, K. et all. Ligas de memória de forma. Metalurgia, Moscou, 1990
- Otsuka, K. and Wayman, C.M. Shape Memory Materials. Cambridge University Press, UK, 1999
- Schmidt, W., 1979, "Materiais Elétricos", Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brasil, pp. 29-78.

Soares, A.B., 1997, "The Application of SMA in the design of prosthetic devices", Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA.
Pons, J. et al. MANUS: Modular Anthropomorphous User-Adaptable Hand Prosthesis with Enhanced Mobility and Force Feedback : Prosthesis actuation. Madri, Espanha : Katholieke Universiteit Leuven, 1999. 26 p.

PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA EM PRÓTESES

SANTOS, Christian Mariani Lucas

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - E-mail: cmls1@bol.com.br

DYNNIKOV, Vladimir Ivanovitch

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - E-mail: dynnikov@npd.ufes.br - UFES.

***Abstract.** The creat of single crystal Cu-Al-Ni alloys extended the horizon of application for shape memory alloys. The significant increase of number of cycles without vestigial plastic deformation and a bigger linear deformation, helps in the creation of new types of actuators in some areas of Engineering that could also be used in prostheses. A detailed characterization becomes necessary to have the perspectives of application of the referring cited alloys. The heating methods for electric resistance are in focus in this work.*

***Keywords:** shape memory alloy, single cristal, heating methods*