



## FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE MOLAS OU ARRUELAS BELLEVILLE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Francisco Fernando Roberto Pereira<sup>1</sup>, Carlos José de Araújo<sup>2</sup>

### RESUMO

Ligas com memória de forma (LMF) são materiais que tem forte potencial aplicativo como atuadores termomecânicos em diversos setores, como os de petróleo e gás natural, aeroespacial, automobilístico, médico-odontológico e de energia elétrica. Este potencial está relacionado à capacidade de geração de esforço mecânico acompanhado ou não de deformação quando do aquecimento controlado destes materiais. Este trabalho teve por objetivo geral fabricar atuadores do tipo arruela Belleville de ligas base Ni-Ti LMF e avaliar o desempenho dos mesmos, visando sua aplicação em juntas aparafusadas inteligentes. Para isso selecionou-se uma LMF Ni-Ti de composição equiatômica, que corresponde a composição nominal em peso de 55Ni-45Ti e a partir dela produziu-se os atuadores através da adaptação do processo de fusão e conformação *Plasma Skull Push Pull* (PSPP). Uma vez aprimorada a técnica de fabricação dos atuadores de LMF, foram realizados ensaios preliminares de geração de força em função da temperatura utilizando uma máquina universal de ensaios. Os resultados obtidos demonstraram a geração de picos de força de até 6 kN e de forças residuais de pré-carga da ordem de 1 kN, indicativos do potencial destes materiais para o desenvolvimento de aplicações concretas, principalmente no setor de petróleo e gás.

**Palavras-chave:** Ligas com memória de forma, arruelas Belleville, juntas aparafusadas inteligentes.

## FABRICATION AND THERMOMECHANICAL CHARACTERIZATION OF SHAPE MEMORY ALLOY BELLEVILLE WASHERS

### ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMA) are materials that have an important applicative potential as thermomechanical actuators in several fields, such as oil and gas Industry, aerospace, medical and dental and electrical energy. This potential is due to the ability of SMA for generation of mechanical force through the Shape Memory Effect (SME). This work had the main objective of manufacturing Belleville washer shape memory actuators of Ni-Ti SMA and evaluates their performance, aiming applications in smart bolted joints. For this, it has been selected a Ni-Ti SMA of equiatomic composition, which corresponds a weight nominal composition of 55Ni-45Ti. From this SMA, the actuators have been produced by adapting the Plasma Skull Push Pull method (PSPP). Once improved the manufacturing technique of SMA actuators, tests of force generation as a function of temperature were accomplished using a universal testing machine. The obtained results shown maximum force generation of 6kN and a residual force around 1kN, indicating a large potential for application of these materials for development of real applications, mainly in the oil and gas Industry.

**Keywords:** Shape memory alloys, Belleville washers, smart bolted joints.

<sup>1</sup> Aluno de Curso de Engenharia Mecânica, Depto. de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: [franciscofernando1989@hotmail.com](mailto:franciscofernando1989@hotmail.com)

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: [cdearaujo@ufcg.edu.br](mailto:cdearaujo@ufcg.edu.br)

## INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) constituem um grupo seletivo de materiais metálicos que têm a capacidade de regressar a forma original após sofrer uma deformação plástica com aquecimento subsequente. Essa recuperação de forma está diretamente associada à aplicação de um campo de temperatura ou a simples retirada do carregamento mecânico que origina a deformação. Esse fenômeno, estando relacionado à temperatura em que o material se encontra, provoca importantes alterações em uma série de propriedades físicas e mecânicas (Rodrigues; 2007).

Atuadores de LMF estão recebendo um interesse especial, devido às variadas possibilidades de aplicação. Por exemplo, há uma grande tendência internacional de se desenvolver juntas aparafusadas inteligentes, constituídas de atuadores de LMF do tipo arruelas, que são teoricamente capazes de recuperar um nível de pré-carga eventualmente reduzido devido a um relaxamento de uma união aparafusada. Dessa forma, inseriram-se nesse contexto atuadores de LMF do tipo arruelas Belleville, que devido à sua forma cônica possuem uma capacidade de resistir a grandes esforços, além de serem extremamente compactas. Patenteadas na França por J. F. Belleville em 1867, as arruelas ou molas Belleville possuem a forma de disco cônico que apresentam uma relação não-linear entre força e deflexão, tornando-as muito úteis em algumas aplicações. Estes elementos mecânicos são extremamente compactos e capazes de resistir a grandes esforços de compressão, com deflexões bastante limitadas (Norton; 2006).

Deste modo, os atuadores de LMF do tipo arruelas Belleville possivelmente podem ser capazes de recuperar um nível de pré-carga eventualmente reduzido devido a um eventual relaxamento de uma união aparafusada. Para isso esta união deve ser equipada com um sistema contendo um atuador de LMF do tipo arruela pré-deformada em compressão, um sistema de aquecimento e um sistema de monitoramento. Assim, o sistema de monitoramento seria capaz de detectar um nível crítico, pré-determinado, da força de acoplamento e acionar o sistema de aquecimento de modo a ativar a expansão do atuador por efeito memória de forma e, conseqüentemente, recuperar a força de acoplamento (pré-carga) da junta aparafusada (Andersen *et al*, 1997; Andersen *et al*, 1999; Ghorashi *et al*, 2004; Hesse *et al*, 2004; Peairs *et al*, 2004; Antonios *et al*, 2006).

Uma vez desenvolvida uma técnica de fabricação de arruelas Belleville de LMF, ter-se-á um poderoso instrumento de recuperação de pré-carga, que montado junto com um conjunto mecânico apropriado e aliado a um sistema de monitoramento, pode formar um sistema mecânico ativo. Esse sistema pode ser instalado em máquinas e/ou estruturas que necessitam de intensa manutenção, devido a folga de alguns componentes, causada por fatores como vibração do sistema, auto-relaxamento, etc. Dessa forma, a nova manutenção pode tornar-se simples e esporádica, influenciando positivamente em questões de projeto, tais como redução de custos com manutenções e simplificação da estrutura do sistema.

Portanto, tendo em vista o grande potencial aplicativo de atuadores de LMF do tipo arruela Belleville em várias áreas, o objetivo deste trabalho foi selecionar ligas de Ni-Ti com memória de forma passíveis de serem usadas na fabricação de arruelas Belleville, projetar e fabricar um molde metálico e um acessório (coquilha) para adaptação do molde em uma máquina de fusão a plasma pelo processo *Plasma Skull Push-Pull* (PSPP) e levantar características preliminares do comportamento termomecânico das arruelas fabricadas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

### **Fabricação de uma Arruela Belleville pelo processo *Plasma Skull Push-Pull* (PSPP)**

Para confeccionar a arruela Belleville com memória de forma selecionou-se uma LMF Ni-Ti de composição equiatômica, que corresponde a composição nominal em peso de 55Ni-45Ti.

Os elementos químicos (Ni e Ti) foram fundidos em uma máquina de fusão a plasma Discovery All Metal, da EDG Equipamentos e Controles, cuja seqüência de fusão é mostrada na figura 1. A fusão foi realizada com os elementos empilhados em um cadinho de cobre e sob um eletrodo de tungstênio, através do processo *Plasma Skull Push-Pull* (PSPP) do equipamento Discovery All. Nesse processo, o metal é fundido sobre uma fina camada dele mesmo, em atmosfera protetora de argônio, e depois injetado em um molde de alumínio, levando a obtenção de uma pastilha cilíndrica, conforme indica a seqüência da figura 1. Contudo, antes da injeção para formação da pastilha, a liga em estudo

foi fundida quatro vezes visando atingir uma melhor homogeneidade do produto final, ocorrendo injeção no molde metálico na quinta fusão.

Antes do procedimento de fusão, a coquilha (figura 2) foi pré-aquecida a uma temperatura de 300 °C e o molde a 550 °C. Assim, diminui-se o choque térmico entre o metal líquido e o molde, aumentando o tempo que o metal líquido permanece em contato com o molde, melhorando o acabamento do produto final.

### Adaptação da máquina de fusão a plasma para fabricação de arruelas Belleville

Para se obter a forma desejada de arruela Belleville foi preciso realizar adaptações ao processo de fusão e conformação da figura 1. Assim, uma nova coquilha de alumínio para receber o molde de aço inox para formação da arruela Belleville foi projetada usando a ferramenta CAD SolidWorks, conforme indicam as figuras 2 e 3. Conforme ilustra a figura 2, a tampa da coquilha é fixada usando quatro parafusos. Para garantir uma boa vedação, em termos de vácuo na coquilha, utilizou-se também um anel de borracha do tipo "oring".

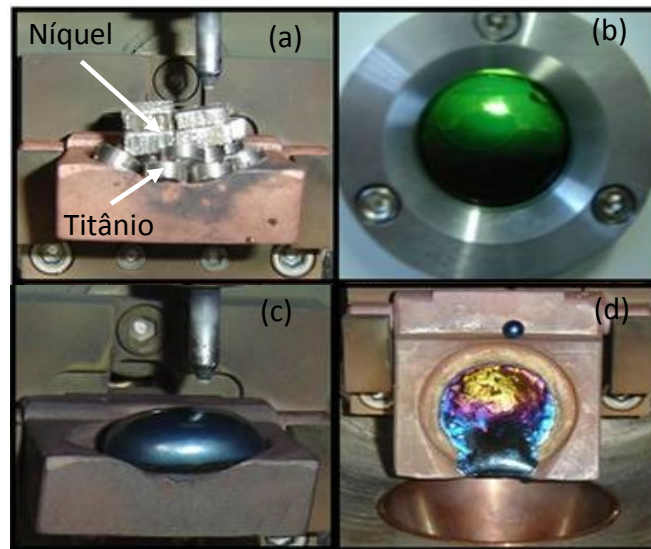


Figura 1. Seqüência de fabricação de LMF Ni-Ti pela técnica PSPP. (a) Ni e Ti puros no cadinho de cobre. (b) Tocha rotativa de plasma. (c) Botão de Ni-Ti obtido. (d) Injeção do botão de Ni-Ti fundido em molde metálico (não mostrado).

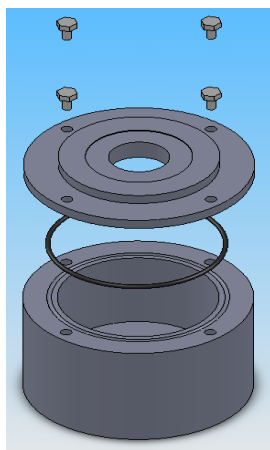


Figura 2. Vista explodida da nova coquilha de alumínio projetada em SolidWorks.



Figura 3. Detalhe da coquilha de alumínio e montagem na máquina de fusão a plasma.

### Projeto e dimensionamento de um molde para fabricação de arruelas Belleville

O projeto do molde para a fabricação de arruelas Belleville foi desenvolvido tendo como objetivo economia de material e também minimização de etapas de usinagem, conhecendo-se a alta dureza

da LMF Ni-Ti. Portanto, planejou-se obter este dispositivo em uma única etapa de fusão e conformação, com suas dimensões o mais próximo possível da forma final especificada. Essa etapa considerou a instalação do molde na nova coquilha de alumínio e a fabricação na máquina de fusão a plasma apresentada na figura 3.

Desta forma, a etapa do projeto do molde consistiu da busca pelas dimensões padronizadas das arruelas Belleville. Isso foi realizado com base no gráfico apresentado na figura 4, onde se podem verificar as curvas de diversas razões  $h/t$  para as arruelas Belleville, tendo em vista a carga aplicada em função do achatamento. Sendo assim, construiu-se a tabela 1, tendo como base os parâmetros dimensionais mostrados na figura 5.

A partir dessa tabela escolheu-se uma razão  $h/t$  igual a 2,83, obtendo assim uma curva S que deve ser útil para mecanismos de atuação de pressão. Espera-se assim que a resposta da arruela Belleville seja bastante considerável para os experimentos de geração de força.

Com base, na razão  $h/t$  especificada, nas relações entre os diâmetros da arruela e em relações trigonométricas, foi desenvolvida a tabela 1. Os valores iniciais de entrada foram o diâmetro maior (D) e a espessura (t). Portanto, foram calculados os outros parâmetros para vários valores de espessura.

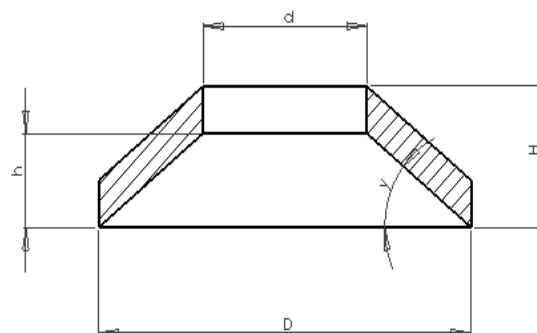
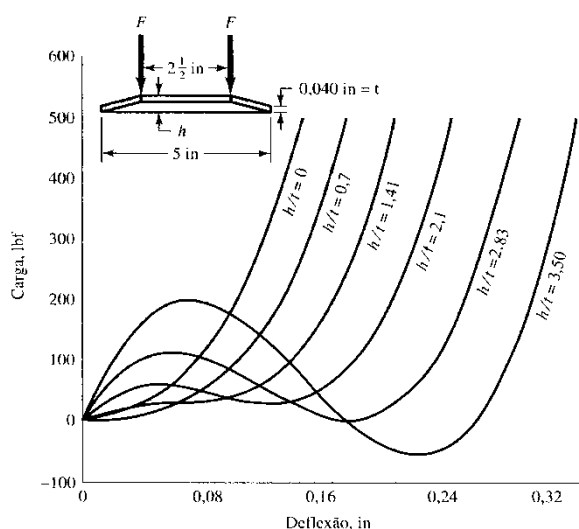


Figura 4. Características normalizadas de força-deflexão de molas Belleville para várias razões  $h/t$ .  
Fonte: Shigley et al.; 2006.

Figura 5. Parâmetros dimensionais para uma arruela Belleville.

Tabela 1. Parâmetros dimensionais para uma arruela Belleville.

Nota: medidas em milímetros e ângulos em graus.

Diâmetro maior (D)	Espessura (t)	Diâmetro menor (d)	Altura menor (h)	Altura maior (H)	Ângulo interno (y)
20	1.8	10	5.1	7.7	45.5
20	2	10	5.7	8.7	48.5
20	2.5	10	7.1	11.4	54.7
25	1.8	12.5	5.1	7.4	39.2
25	2	12.5	5.7	8.4	42.2
25	2.5	12.5	7.1	10.8	48.5
30	1.8	15	5.1	7.3	34.2
30	2	15	5.7	8.2	37.0

Tendo em vista a economia de material e considerando que a espessura da arruela Belleville pode diminuir devido ao mau preenchimento do material no molde durante o processo de fusão e conformação, resolveu-se adotar uma espessura relativamente alta, de 2,5 mm. Além disso, foi selecionado um diâmetro maior de 25 mm e com esses valores determinaram-se todos os outros parâmetros usando a tabela 1.

Uma vez definidas as dimensões da arruela Belleville, foi projetado o molde para sua fabricação, usando a ferramenta computacional CAD SolidWorks, conforme ilustram as figuras 6 e 7. O arranjo dos quatro componentes mostrados é tal que quando ocorre o acoplamento dos mesmos origina-se uma cavidade cônica que é preenchida pela LMF Ni-Ti e forma a arruela desejada (figura 7).

Na base do molde da figura 6 verifica-se um furo inferior, que foi concebido com o intuito de se introduzir um sacador para facilitar a desmoldagem da arruela fabricada. É possível notar também, nesse mesmo componente, que foram feitos 5 rasgos no diâmetro externo da base inferior. Esses rasgos funcionam como saída para o gás argônio injetado com o metal fundido e impede que se formem vazios na arruela obtida, além de permitir a saída de excesso de material.

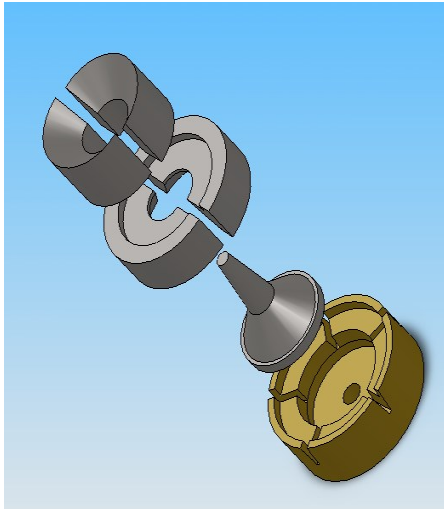


Figura 6. Vista explodida dos componentes do molde, mostrada em projeção isométrica, concebida em SolidWorks, para fabricação da arruela Belleville.

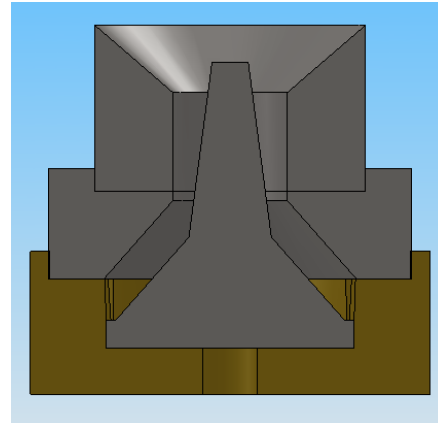


Figura 7. Vista em corte do molde montado e detalhe do molde.

O molde concebido conforme ilustra a figura 7 foi confeccionado por um processo de usinagem em torno mecânico. O material escolhido para a fabricação foi o aço inoxidável, por ser de fácil usinagem e também mau condutor de calor. Esse fato permite que a massa de metal da LMF de Ni-Ti mantenha-se líquida pelo maior tempo possível, de modo a preencher toda cavidade cônica do molde. Pelo detalhe do molde na figura 7, verifica-se que o mesmo foi fabricado de modo bi-partido. Isso foi previsto para minimizar as eventuais dificuldades de desmoldagem após conformação do metal líquido no molde.

Após a confecção do molde da figura 7, foi realizada uma primeira fusão com o processo descrito na figura 1 para a composição em peso de 55%Ni-45%Ti e uma massa total de 34 gramas. Obteve-se como resultado a arruela Belleville da figura 8. Observa-se que a forma geométrica do molde levou a um bom resultado em relação ao preenchimento da cavidade cônica pelo metal líquido. No entanto, verificou-se também na parte interna da arruela Belleville a presença de trincas como indica a seta na figura 8.



Figura 8. Produto inacabado da fusão e detalhe indicando trincas.

Com o intuito de resolver os problemas de trincamento, partiu-se para a modificação da geometria do molde. Foi realizada uma análise semi-empírica e chegou-se à conclusão de que tais trincas poderiam ser originadas durante o processo de solidificação da LMF Ni-Ti nos pontos de

concentração de tensão do molde (“cantos vivos”). A partir dessa hipótese, foi realizada uma alteração no pino do molde, conforme pode ser visto na figura 9. Nessa alteração, procurou-se suavizar os cantos vivos de onde partiam os principais pontos de trinca.

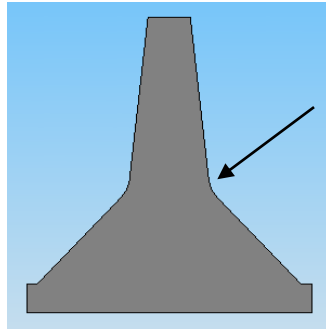


Figura 9. Vista frontal, em corte, do pino com detalhe da suavização dos cantos vivos.

Realizadas as alterações, partiu-se para uma nova série de fusões, tendo em vista que os demais componentes do molde da figura 6 foram mantidos inalterados. Após todas as etapas de fusão e desmoldagem, as arruelas Belleville finais continuaram apresentando trincas, dessa vez partindo da ponta superior do pino.

Novamente partiu-se para alterações na geometria do molde. Dessa vez, foi feito o projeto de um novo molde, apresentado na figura 10.

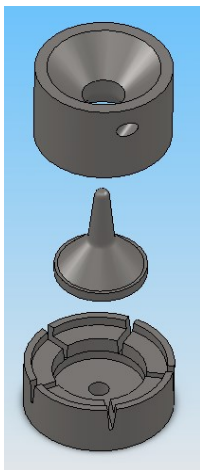


Figura 10. Vista explodida, em projeção dimétrica, dos componentes do novo molde.

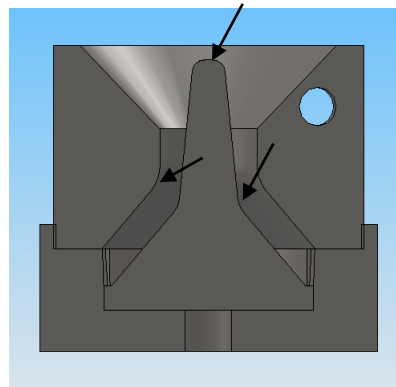


Figura 11. Vista frontal cortada do molde com indicação de detalhes de suavização dos cantos vivos.

Como se verifica na figura 10, foram fabricados três novos componentes. A base inferior foi fabricada com as mesmas medidas e com a mesma geometria, modificando-se apenas o material, pois o bronze anteriormente usado tem um coeficiente de condutividade térmica muito alto que estava dificultando o bom preenchimento do molde pelo metal líquido, em virtude da rápida troca térmica. Assim, esse componente foi fabricado em aço inoxidável. Com relação ao pino, o mesmo teve os principais concentradores de tensão suavizados, conforme mostrado na figura 11.

A tampa superior foi o componente que recebeu as maiores alterações. A mesma foi confeccionada de forma bi-partida para facilitar a desmoldagem. Foi previsto também um furo lateral para introdução de um parafuso, com o intuito de separar as partes do molde quando da desmoldagem. Além disso, suavizaram-se os principais concentradores de tensão para eliminar a possibilidade de trincas superficiais no produto final, conforme mostrado no detalhe da figura 11.

Após o projeto, todas as partes do molde foram fabricadas por usinagem em torno mecânico, como mostrado nas figuras 12 e 13.



Figura 12. Componentes do molde separados.



Figura 13. Detalhe do molde montado.

### Procedimento para testes de geração de força com a arruela Belleville confeccionada

A arruela Belleville confeccionada a partir das adaptações do processo PSPP foi testada através de ensaio de geração de força. Para esse teste utilizou-se uma máquina universal de ensaios eletromecânica, marca INSTRON, modelo 5582, mostrada na figura 14.



Figura 14. Máquina universal de ensaios Instron 5582.

Para a realização do teste de geração de força é necessário primeiramente deformar a arruela, em compressão, a temperaturas inferiores a 273K (0 °C). Isto é, a arruela de LMF precisa ser resfriada para temperaturas em que as mesmas se encontram em estado martensítico, e assim podem sofrer deformações plásticas termicamente reversíveis. Este procedimento é indispensável para se obter a posterior tendência de expansão da arruela através do efeito memória de forma durante o aquecimento.

Para possibilitar esses ensaios, projetou-se um conjunto de acessórios específicos para a medição da geração de força através do EMF da arruela utilizando-se a máquina INSTRON 5582. Nesse conjunto (figura 15), a arruela é montada entre o pino de uma base de bronze e um punção de aço inoxidável. Foi previsto também um copo que serve de recipiente do nitrogênio (N<sub>2</sub>) líquido usado no resfriamento da arruela para o estado martensítico.

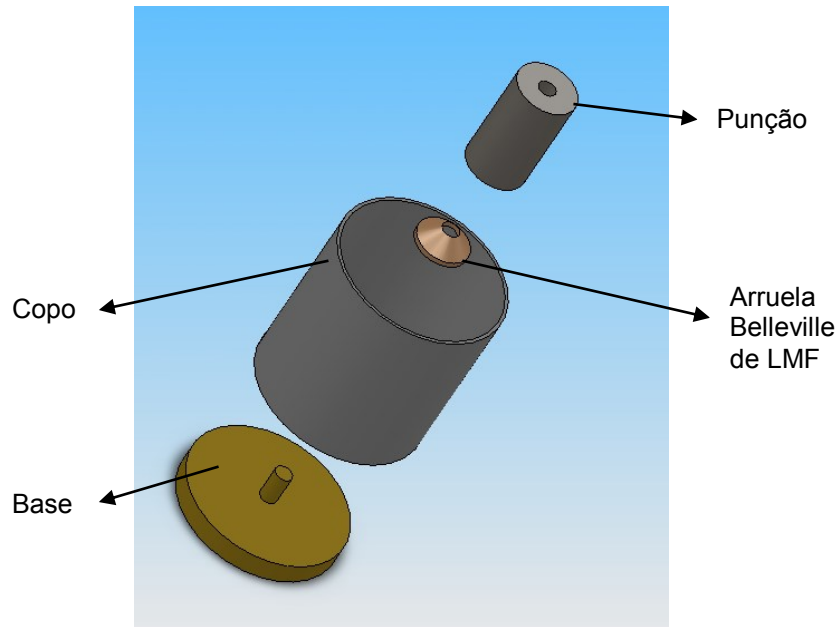


Figura 15. Vista explodida dos componentes acessórios para o ensaio de geração de força. Concepção em SolidWorks.

O punção é pressionado por um dispositivo circular que está conectado a célula de carga da máquina de ensaios. Um microtermopar tipo K é instalado na arruela Belleville em teste para o acompanhamento de sua temperatura durante o resfriamento e o aquecimento utilizando fluxo de ar quente advindo de um soprador térmico. Esse arranjo experimental pode ser visualizado na figura 16.

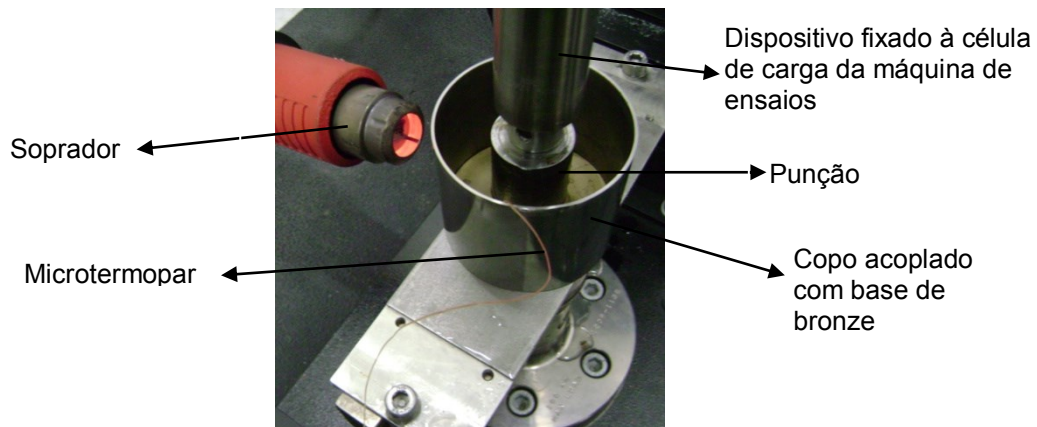


Figura 16. Detalhe de montagem para o ensaio de geração de força da arruela Belleville.

As etapas do ensaio de geração de força podem ser resumidas no desenho esquemático da figura 17. Como se pode verificar, no item 1 está sendo depositado  $N_2$  líquido no copo, para que a arruela Belleville atinja temperaturas inferiores a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , em que a mesma encontrará o estado martensítico. A arruela é submetida ao carregamento mecânico de compressão, e quando for atingida uma deformação de 3% (relativa à altura da arruela), no item 2, cessa-se a alimentação do copo por  $N_2$ . Nesse momento, um soprador térmico é ativado (item 3) até a temperatura da arruela Belleville atingir aproximadamente  $60\text{ }^\circ\text{C}$ . Nesse intervalo de temperatura a arruela Belleville começa a gerar força pela tendência de expansão por efeito memória de forma. A partir daí, no item 4, a arruela se resfria naturalmente até a temperatura ambiente (aproximadamente  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) e uma força residual é medida neste instante.



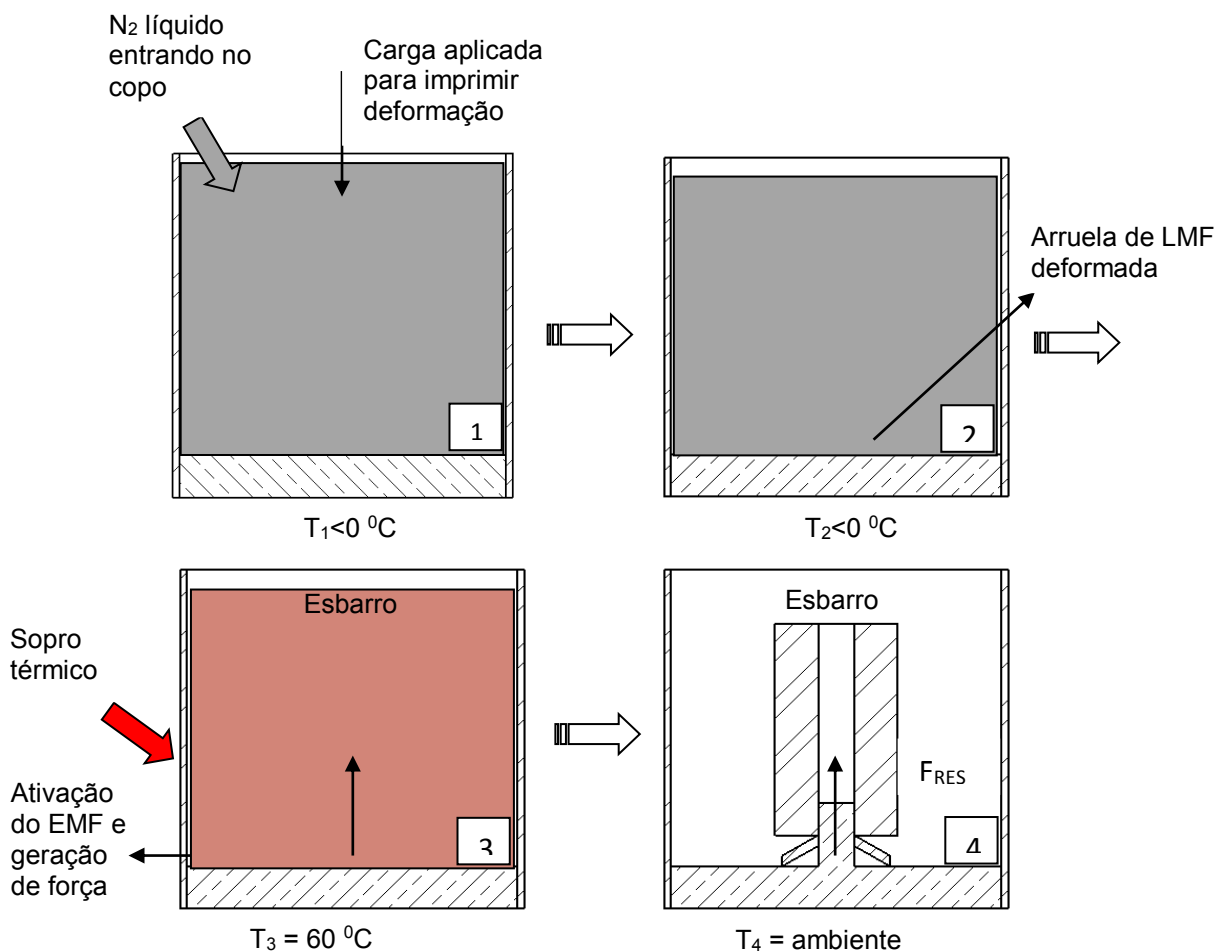


Figura 17. Diagrama esquemático do experimento para geração de força em arruelas Belleville de LMF.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Obtenção do produto final

Com o molde da figura 13, adotou-se o mesmo procedimento de fusão a plasma já descrito anteriormente, para a composição em peso de 55%Ni-45%Ti e uma massa total de 34 gramas. O resultado do produto obtido é mostrado nas figuras 18 e 19.



Figura 18. Produto final inacabado da fusão.



Figura 19. Arruela Belleville da LMF Ni-Ti cortada e acabada.

Após os procedimentos de correção da geometria do molde, observou-se que as arruelas Belleville passaram a ser obtidas com bom acabamento superficial e sem trincas internas.

### Ensaio de geração de força

O ensaio para geração de força, segundo o procedimento descrito na figura 17, foi realizado com a arruela Belleville da figura 19. O resultado geral pode ser visualizado na figura 20.

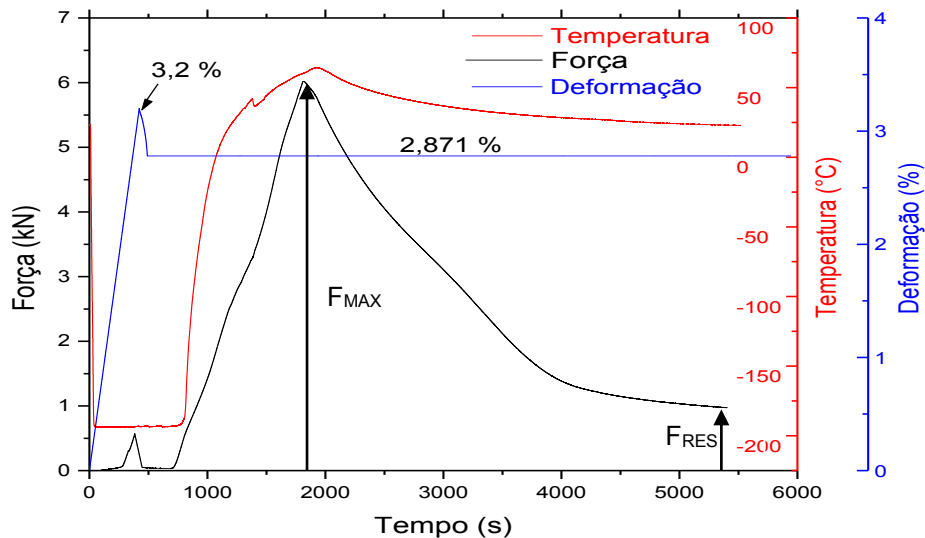


Figura 20. Gráfico de geração de força para uma arruela Belleville da LMF Ni-Ti, apresentando eixos de força, temperatura e deformação.

Nesta figura observa-se que o experimento foi realizado para uma deformação de 3,2% de pico, com uma força máxima ( $F_{MAX}$ ) gerada, pela tendência de EMF durante o aquecimento, de aproximadamente 6 kN. Após a relaxação “forçada”, permaneceu-se com uma deformação de 2,871% durante todo o aquecimento e retorno à temperatura ambiente, onde se constata uma força residual ( $F_{RES}$ ) de aproximadamente 1kN.

Na realidade, o pico de força ( $F_{MAX}$ ), observado na figura 20, não é gerado apenas pela ativação do EMF, mas também pelas diferenças de coeficientes de dilatação térmica dos membros da máquina de ensaio (ou membros da união). Assim, durante o resfriamento até a temperatura ambiente observa-se uma redução da força gerada até a sua estabilização. A razão desta redução é que os diferentes coeficientes de dilatação térmica dos membros da união resultam em diferentes deformações durante o resfriamento do conjunto à temperatura ambiente (Hesse *et al*, 2004).

O resultado do valor de força residual ( $F_{RES}$ ) deste teste de geração de força foi comparado com aquele obtido por Silva *et al* (2008) com uma arruela lisa, que está apresentado na figura 21. Observa-se nessa figura que, com o corte do aquecimento ocorre um decremento exponencial da temperatura até 297 K (24 °C), que é acompanhado pela estabilização da força residual ( $F_{RES}$ ) em aproximadamente 935 N. Assim, constata-se que este resultado é bastante próximo daquele obtido neste trabalho.

Comparando-se, também, o valor de  $F_{MAX}$  obtidos neste trabalho com aqueles obtidos por Hesse *et al* (2004), que utilizou uma LMF 55,7Ti-Ni (% peso), verifica-se que a arruela confeccionada neste trabalho gerou uma força de pico ( $F_{MAX}$ ) muito superior. Os valores de forças máximas ( $FG_1$  e  $FG_2$ ) obtidos por Hesse *et al* (2004), estão apresentados na figura 22. Labrecque *et al* (1996) obteve uma arruela Belleville de uma LMF Cu-Al-Ni-Mn-Ti, e este dispositivo foi capaz de gerar forças de pico da ordem de 2,0 kN. Já Antonios *et al* (2006) alcançaram forças máximas da ordem de 2135 N com uma arruela lisa de uma LMF Ni-Ti.

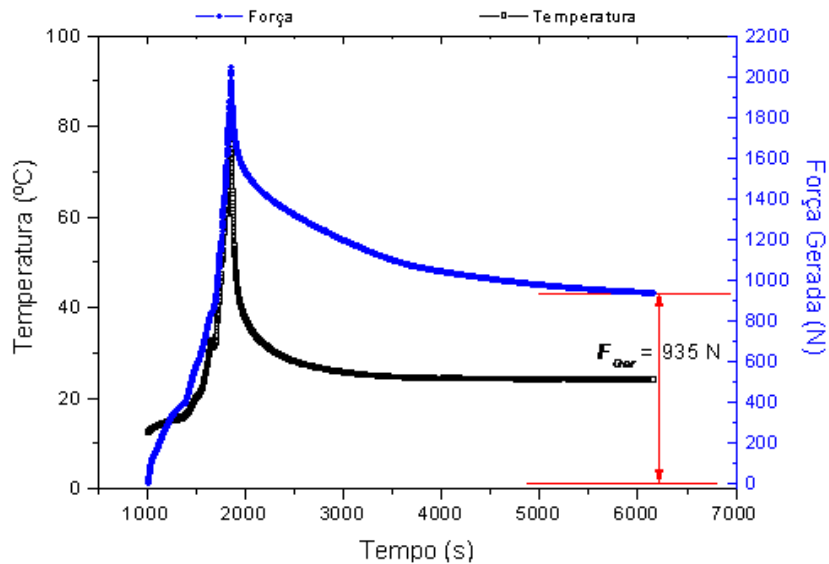


Figura 21. Geração de força através da ativação do EMF em uma arruela lisa da mesma LMF Ni-Ti  
 Fonte: Silva *et al*, 2008.

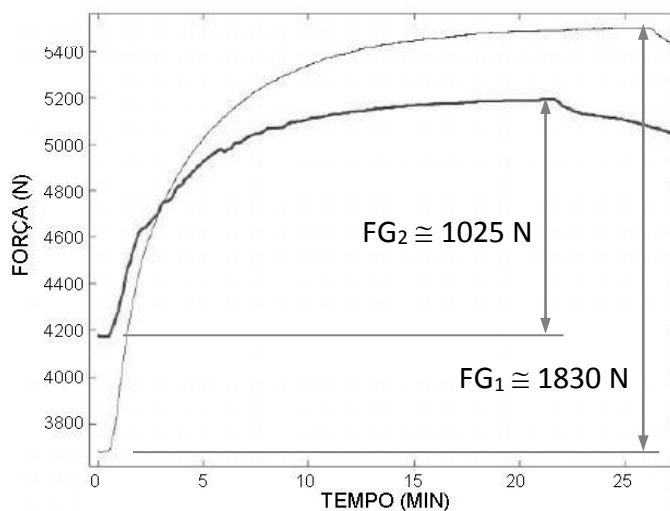


Figura 22. Geração de força através de uma arruela de LMF para dois níveis de pré-cargas iniciais diferentes. Fonte: Hesse *et al*, 2004.

## CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e discussões realizadas, é possível concluir que:

- As ligas com memória de forma (LMF) utilizadas neste trabalho foram adequadas para gerar forças através da restrição do fenômeno de memória de forma;
- A fabricação dos atuadores do tipo arruela Belleville de LMF foi realizada com sucesso através da adaptação da técnica de fusão e conformação *Plasma Skull Push Pull* (PSPP). Depois de alguns estudos e planejamentos foi possível obter com sucesso uma combinação de processos de fabricação (PSPP e usinagem) para a obtenção da forma final desejada para o atuador;
- Após o processo de otimização do projeto dos moldes, as arruelas Belleville de Ni-Ti foram obtidas com êxito, dentro dos padrões pré-estabelecidos;

- A deformação dos atuadores foi realizada com sucesso. A montagem realizada na máquina universal de ensaios mecânicos permitiu os controles da deformação e da temperatura dos atuadores satisfatoriamente;
- O atuador do tipo arruela Belleville de LMF Ni-Ti testado originou forças de pico ( $F_{MAX}$ ) da ordem 6,0 kN e forças residuais a temperatura ambiente ( $F_{GER}$ ) da ordem de 1,0 kN. Estas forças podem ser usadas, por exemplo, para recuperar pré-cargas em parafusos de uniões inteligentes, indicando o potencial destes materiais para o desenvolvimento de aplicações concretas.

### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica e aos colegas de laboratório Jackson de Brito Simões, Rômulo Pierre Batista dos Reis e Emerson Gerônimo pelo apoio durante o período vigente da bolsa.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, A., Herfjord, H. J., Martinsen, A. M., Sangesland, S., Sivertsen, Å. **Feasibility study of shape memory alloys in oil well applications**. SINTEF Petroleum, IKU Report n° 32.0896.00/01/97, 107p, 1997.

ANTONIOS, C.; INMAN, D. J.; SMAILI, A. Experimental and Theoretical Behavior of Self-healing Bolted Joints. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, p. 499-509, 2006.

GHORASHI, M.; Inman, D. J. Shape Memory Alloy in Tension and Compression and its Application as Clamping-force Actuator in a Bolted Joint: Part 2 – Modeling. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Vol. 15, p. 589-600, 2004.

HESSE, T.; Ghorashi, M.; Inman, D. J. Shape Memory Alloy in Tension and Compression and its Application as Clamping-force Actuator in a Bolted Joint: Part 1 – Experimentation. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Vol. 15, p. 577-587, 2004.

NORTON, R. L. **Projetos de Máquinas: uma abordagem integrada**. 2 ed. São Paulo: Bookman Companhia Editora S. A., 2006, p.738-742.

PEAIRS, D. M.; Park, G.; Inman, D. J. Practical issues of activating self-repairing bolted joints. **Journal Smart Materials and Structures**, Vol. 13, p. 1414-1423, 2004.

RODRIGUES, L. F. A.; Desenvolvimento de um compósito ativo tipo CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) reforçado por fios TiNi com memória de forma. III Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande. Fabricação e testes preliminares de um compósito ativo: matriz polimérica reforçada por fios ti-ni com memória de forma, 2006.

SHIGLEY, J. E; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7 ed. São Paulo: Bookman Companhia Editora S. A., 2006, 526p.

SILVA, Marcos Mesquita da. Fabricação de uma liga Ti-Ni-Cu com memória de forma pelo processo plasma skull push-pull: comparações com a liga Ti-Ni equiatômica, Campina Grande: Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2006. 52 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).