

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE UMA LIGA DE NITI REPROCESSADA POR FUSÃO A PLASMA E INJEÇÃO EM MOLDES METÁLICOS*

Jackson de Brito Simões¹
Francisco Fernando Roberto Pereira²
Jorge Otubo³
Carlos José de Araújo⁴

Resumo

As Ligas com efeito de Memória de Forma (LMF) são metais funcionais que podem recuperar grandes deformações, superiores a 5%, quando submetidos a carregamento mecânico e/ou aquecidos. Este fenômeno ainda surpreende pesquisadores e engenheiros de projetos, materiais e processos. Esses metais possibilitam o desenvolvimento de atuadores termomecânicos capazes de gerar esforço mecânico com o bloqueio da recuperação de forma. Inúmeros são os processos para obtenção dessas LMF, cada um com sua particularidade e limitação específica. Nesse contexto, este trabalho avalia o efeito do reprocessamento pela técnica Plasma Skul Push-Pull (PSPP) e do tratamento térmico de solubilização nas propriedades térmicas de transformação de fase de uma LMF 55,1Ni-44,9Ti (% em peso) obtida originalmente pelo processo de fusão por indução a vácuo (VIM). Para isso, a LMF foi refundida com uma tocha de plasma e vazada sob pressão em quatro moldes metálicos distintos (aço, bronze, alumínio e cobre). As técnicas de caracterização térmica Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e Resistência Elétrica em função da Temperatura (RET) foram utilizadas para avaliar o efeito desse reprocessamento e do subsequente tratamento térmico de solubilização a 850°C em diferentes tempos. Verificou-se que a injeção em molde metálico proporciona uma significativa redução nas temperaturas de transformação de fase, da ordem de 30°C em relação ao material bruto obtido por VIM. Por fim, foi possível concluir que a LMF NiTi reprocessada mantém a transformação de fase mesmo após tratamentos de solubilização a 850°C em tempos mais longos (8 h), contrariamente ao material originalmente obtido por VIM.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; Fusão por plasma; Solidificação; Tratamento de solubilização.

THERMAL CHARACTERIZATION OF A NITI ALLOY REPROCESSED BY PLASMA MELTING AND INJECTION IN METAL MOLDS

Abstract

Shape memory alloy (SMA) are functional metals that can recover large strain, greater than 5%, when subjected to mechanical loading and/or heated. This phenomenon still surprises researchers and design engineers, materials and processes. These metals possible to develop thermo-mechanical actuator that can generate mechanical force with the blocking of shape recovery. There are numerous processes for obtaining these SMA, each with their particularity and specific limitation. In this context, this study evaluates the effects of reprocessing by the technical Plasma Skul Push-Pull (PSPP) and solubilization thermal treatment in the thermal properties of phase transformation of the SMA 55,1Ni-44,9Ti (wt%) originally obtained by vacuum induction melting process (VIM). For this, the SMA was remelted with a plasma torch under pressure and poured into four different metal molds (steel, bronze, aluminum and copper). The thermal characterization techniques of Differential Scanning Calorimetry (DSC) and electrical resistance as a function of temperature (ERT) were used to evaluate the effect of reprocessing and subsequent solubilization heat treatment at 850°C at different times. It was found that the metal injection molding provides a significant decrease in the phase transformation temperatures of the order of 30°C relative to raw material obtained by VIM. Lastly, it was concluded that the LMF NiTi reprocessed keeps the phase transformation even after solubilization treatment at 850°C for longer times (8 h), contrary to material originally obtained by VIM.

Keywords: Shape memory alloys; Plasma melting; Solidification; Solubilization treatment.

¹ Eng. Mecânico, Mestre, professor Assistente I, Depto. de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Caraúbas, RN, Brasil.

² Eng. Mecânico, Mestre, aluno de doutorado, Department of Materials Sciences and Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge, Inglaterra.

³ Eng. Mecânico, Doutor, professor Convocado, Depto. de Eng. Mecânica, Instituto Tecnológico Aeronáutico - ITA, São José dos Campos, SP, Brasil.

⁴ Eng. Mecânico, Doutor, professor Associado I, Depto. de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As Ligas com efeito de Memória de Forma (LMF) são metais funcionais que podem recuperar grandes deformações pseudo plásticas quando submetidos a carregamentos mecânicos e/ou aquecidos. Estes materiais podem funcionar como sensores e/ou atuadores simultaneamente, e por isso tem atraído grande interesse para uso potencial em estruturas e sistemas termomecânicos avançados [1]. Aplicações de LMF estão ocorrendo em diversas áreas como aeroespacial, automotiva, telecomunicações, saúde, entre outras [1, 2].

A partir da descoberta do efeito de memória de forma em ligas de NiTi, em 1960, as LMF se tornaram objeto de numerosos estudos, devido à sua resposta em deformação quando submetidas a estímulos externos (temperatura, tensão mecânica ou campo magnético), fornecendo a capacidade de realizar trabalho mecânico [2]. Dentre todas as LMF, o sistema binário NiTi fornece a maioria dos produtos comercialmente disponíveis na atualidade, devido às suas propriedades funcionais únicas associadas com uma boa resistência à corrosão e uma excelente biocompatibilidade [3]. No entanto, a fabricação e o processamento complexo dessas LMF ainda proporcionam alguns obstáculos para o desenvolvimento de novas aplicações [3, 4]. O principal inconveniente das LMF de NiTi, além do difícil controle da composição química, é a sua reatividade extrema em temperaturas de fusão. Para evitar a contaminação atmosférica e visando assegurar elevada pureza do material, o processo de fusão de ligas de NiTi é realizada sob vácuo ou atmosfera inerte [5].

Nos últimos anos, o processamento metalúrgico de lingotes de LMF NiTi tem sido discutida detalhadamente [5, 6]. Existem diferentes alternativas para processamento de LMF em geral, tais como fusão em forno de indução ao ar ambiente (*Air Induction Melting - AIM*), fusão por indução sob vácuo (*Vacuum Induction Melting – VIM*), fusão a arco com eletrodo consumível e não consumível sob vácuo (*Vacuum consumable and non-consumable Arc Melting - VAM*), fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting - EBM*), metalurgia do pó (*Powder Metallurgy - PM*), solidificação rápida (principalmente *Melt-Spinning*) e moagem de alta energia (*Mechanical Alloying - MA*) [6]. O processo de fusão por VIM é uns dos mais utilizados para a fusão de titânio, ligas de níquel, aço inoxidável, cobalto, e ligas especiais. Neste processo, o resultado das forças eletromagnéticas fornece uma excelente agitação da massa fundida garantindo uma maior homogeneidade química e microestrutural do material produzido [7, 8].

Outra técnica que tem sido utilizada em escala de laboratório para a produção de LMF e até mesmo miniatuadores destes materiais é o processo Plasma Skull Push-Pull (PSPP) [6]. Nesse processo, após a realização de vácuo em uma câmara, o metal é envolvido por uma atmosfera protetora de argônio que permite originar uma de tocha plasma. Essa tocha sob rotação proporciona a fusão do metal sob uma fina camada dele mesmo, que em seguida é vazado automaticamente em um molde (metálico ou cerâmico), levando a obter a forma desejada [6].

A estabilidade da transformação de fase nestes metais especiais é fortemente dependente dos tratamentos termomecânicos, trabalho a quente ou a frio e ciclos térmicos [3]. Assim, os tratamentos térmicos para as LMF NiTi são métodos eficientes para manipular as propriedades de transformação de fase desses materiais.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência do reprocessamento PSPP sobre as propriedades térmicas de uma LMF de NiTi que

originalmente foi fabricada pelo processo VIM seguido de forjamento rotativo. O vazamento da LMF após refusão a plasma foi realizado em diferentes moldes metálicos (aço, latão, alumínio e cobre). Adicionalmente, este trabalho também avaliou a influência do tratamento térmico de solubilização da LMF reprocessada a uma temperatura definida (850°C) e sob diferentes patamares de tempo. Esse trabalho utilizou-se das técnicas de caracterização térmica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e variação de resistência elétrica em função da temperatura (RET) para determinar os efeitos do reprocessamento PSPP e tratamentos de solubilização sobre as temperaturas de transformação do material. O estudo deste reprocessamento tem o objetivo de melhorar o processo PSPP para a produção de miniatuadores de LMF obtidos diretamente na forma final desejada, eliminando outras etapas de fabricação, como a usinagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado para avaliar o efeito de reprocessamento pelo processo PSPP e os efeitos dos tratamentos térmicos de solubilização foi uma LMF de NiTi, de composição 55,1Ni-44,9Ti (% em peso). Esta liga foi originalmente fabricada pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA, São José dos Campos - SP, Brasil) usando o processo VIM. O material foi fornecido em forma de um lingote cilíndrico (16 x 130 mm) obtido por forjamento rotativo é denominado de VIM70 (Figura 1).

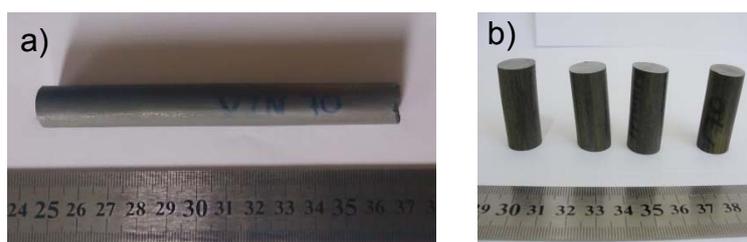


Figura 1. LMF VIM 70 de composição 55,10Ni-44,90Ti (% em peso). a) Lingote circular (16 x 130 mm). b) Barras para reprocessamento PSPP.

Para reprocessar as LMF o lingote (Figura 1a) foi cortado em quatro pequenos tarugos (Figura 1b) numa cortadeira metalográfica de precisão. Cada tarugo, com uma massa de aproximadamente $42,6 \pm 0,5$ gramas, foi levado ao forno de plasma como matéria-prima para refusão e vazamento em quatro moldes metálicos diferentes. Os moldes com cavidade prismática retangular de dimensões 30 x 25 x 5 mm foram fabricados em aço, latão, alumínio e cobre, para avaliar a influência da solidificação em moldes metálicos de diferentes condutividades térmicas (45, 75, 204 e 386 W/m.K, respectivamente, para cada molde).

Uma representação do forno a plasma utilizado e uma sequência típica para a fabricação pelo processo PSPP de LMF NiTi é apresentada (Figura 2). Inicialmente, os metais Ni e Ti são empilhados em um cadinho de cobre (Figura 2b-1) e submetidos a uma atmosfera inerte, após vácuo e introdução do gás argônio na câmara superior. A fusão dos elementos ocorre através de uma tocha rotativa de plasma que é criada por um eletrodo de tungstênio (Figura 2b-2), dando origem a um "botão" de LMF (Figura 2b-3). Quando se fabrica uma LMF a partir dos metais puros, de modo a assegurar uma boa homogeneidade do material fundido, cinco refusões precisam ser realizadas para garantir a homogeneidade da liga produzida. O produto final é obtido quando um "botão" refundido (Figura 2b-3,4) é vazado em

um molde. No caso deste trabalho, a barra de LMF NiTi (Figura 1b) é instalada sob o eletrodo de tungstênio (Figura 2b-1) para uma única refusão seguida de vazamento no molde metálico de geometria prismática (Figura 2f), resultando no produto concebido. Esta geometria permite a retirada de lâminas finas para caracterização térmica via variação de resistência elétrica em função da temperatura.

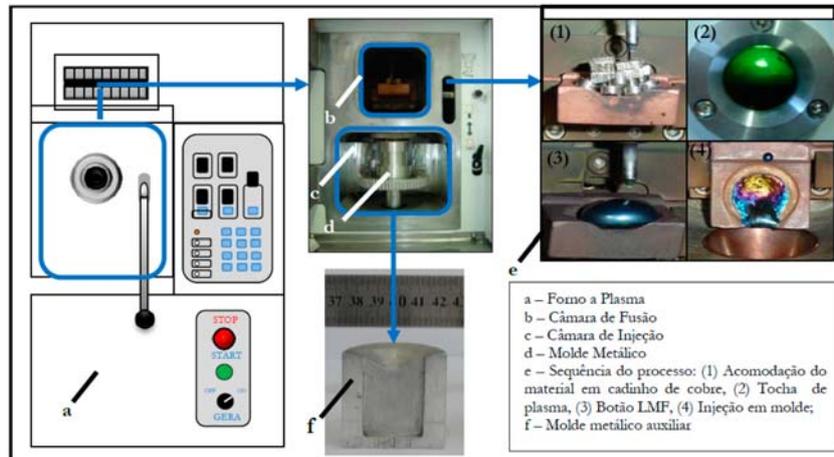


Figura 2. Sequência de processamento PSPP para produção de LMF NiTi.

Todas as barras NiTi foram fundidas sob as mesmas condições de processo além de um mesmo tempo de exposição à tocha de plasma, correspondente a 52 segundos. Após o reprocessamento PSPP, todas as barras prismáticas de NiTi foram cortadas na direção longitudinal para obtenção de lâminas com as dimensões de 25 x 6 x 1 mm. Desta forma, a LMF NiTi VIM70 (Figura 1b) foi caracterizada termicamente em seu estado bruto (como recebida), bruto de reprocessamento via PSSP (nos quatro moldes distintos) e ainda após diferentes tratamentos térmicos de solubilização. Esses tratamentos foram realizados a 850 °C em diferentes tempos em horas, seguindo uma função matemática 2^n ($n = 0, 1, 2$ e 3). Esta função leva à solubilização em tempos de 1, 2, 4 e 8 horas, respectivamente.

A caracterização térmica da LMF NiTi VIM70 foi realizada utilizando a técnica de Calorimetria de Diferencial de Varredura (DSC) com um calorímetro da TA Instruments, modelo Q20. Os ensaios foram realizados em um intervalo de temperatura de 100 °C a -70 °C com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 5 °C/min. Outra técnica utilizada para determinar as temperaturas de transformação da LMF foi à variação da resistência elétrica em função da temperatura (RET). O teste de RET é realizado utilizando um banho térmico ajustável em que cada amostra é submetida a ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento em uma faixa de temperatura compreendida entre 100 °C e -70 °C, enquanto se mede simultaneamente a variação de tensão elétrica através de um sistema de aquisição de dados. Cada amostra é submetida a uma corrente constante de 0,4 A durante o teste.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do reprocessamento da LMF NiTi inicialmente foi realizada por inspeção visual do acabamento superficial das barras prismáticas produzidas e do preenchimento do material nos moldes, conforme mostrado na (Figura 3). Verificou-se que a barra que apresentou melhor acabamento superficial e preenchimento foi

àquela injetada em molde de cobre. Por outro lado, a barra NiTi que apresentou maior oxidação superficial foi aquela vazada em molde de aço. A partir desse resultado inicial, constatou-se que o molde construído com metal ou liga de maior coeficiente de condutividade térmica favorece a obtenção de um melhor acabamento superficial da LMF NiTi. Verifica-se ainda na (Figura 3) que a barra injetada em molde de bronze apresentou defeito tipo "gota-fria" e aquela injetada em molde de alumínio apresentou falha de preenchimento apresentando defeito do tipo "rechupe".



Figura 3. Moldes metálicos com barras de NiTi injetadas no reprocessamento via PSPP.

A (Figura 4) mostra curvas de DSC da LMF NiTi VIM70 fornecida em seu estado bruto e reprocessada em molde de cobre, como também o resultado do respectivo ensaio de resistência elétrica em função da temperatura (RET). Observa-se na curva DSC a presença de apenas dois picos característicos durante o resfriamento (pico superior) e o aquecimento (pico inferior). Em princípio, este resultado pode indicar a presença de uma transformação de fase simples, em uma única etapa, de austenita para martensita e vice-versa.

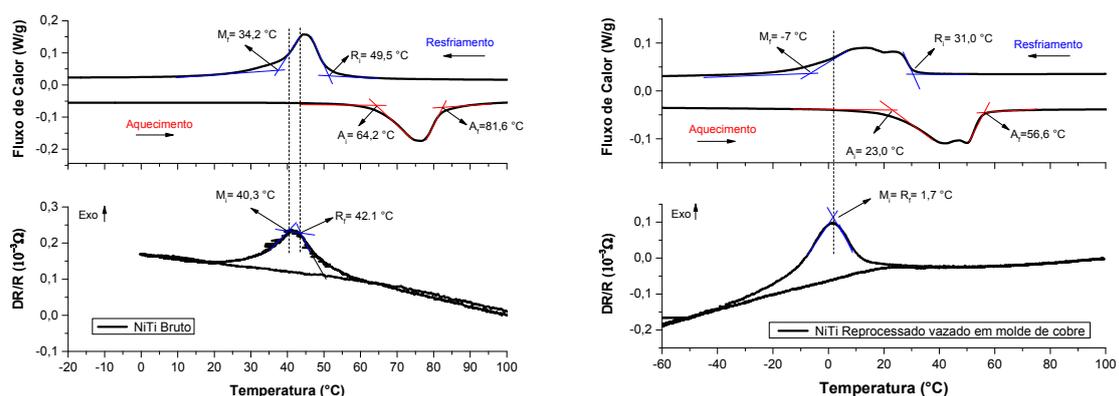


Figura 4. Superposição dos termogramas DSC (acima) e RET (abaixo) para a LMF NiTi VIM70. (a) Bruta. (b) Reprocessada em molde de cobre.

Porém, a análise do resultado em RET permite verificar claramente a presença de um pico relacionado ao aumento e diminuição de resistência elétrica durante o resfriamento. Esse pico de RET reconhecidamente corresponde a uma transformação de fase em 2 etapas, da austenita CCC (B2) inicialmente em uma

martensita romboédrica (fase R) e depois em uma martensita monoclinica (B19') [3]. Esse fato mostra a importância da utilização concomitante das técnicas de DSC e RET para caracterização térmica dessas LMF NiTi, já que a transformação em 2 etapas durante o resfriamento muitas vezes não pode ser visualizada unicamente por DSC. Adicionalmente, os resultados levam a crer que a solidificação rápida da LMF provocada pelo reprocessamento PSPP pode causar distorções na forma dos picos, refletindo interferências na transformação de fase, durante o resfriamento e aquecimento e indicando a necessidade de realização de tratamentos térmicos posteriores para melhorar a homogeneidade do material. Da (Figura 4) constata-se também que as temperaturas de transformação da LMF NiTi VIM70 diminuem após reprocessamento. Os resultados para os outros três moldes metálicos foram semelhantes ao da (Figura 4), por isto essa redução de temperaturas de transformação tem sido considerada como uma característica do processo PSPP.

Na (Tabela 1) são resumidas as temperaturas de transformação da LMF NiTi VIM70 em seu estado bruto de fornecimento e após reprocessamento e vazamento nos quatro moldes distintos, obtidas aplicando o método das tangentes nos resultados da (Figura 4). As temperaturas M_i e R_f foram obtidas pela técnica de RET enquanto as outras temperaturas foram obtidas diretamente das curvas de DSC. As temperaturas de transformação das barras reprocessadas são todas inferiores as do lingote no estado bruto como recebido. No entanto, estas novas temperaturas geralmente não se alteram significativamente com o metal do molde utilizado. Apesar de pequenas variações ocorridas entre os moldes que têm diferentes condutibilidades térmicas, a temperatura de transformação A_f permaneceu praticamente inalterada em todos os casos. Para essa temperatura, especificamente, houve uma redução de 82°C na LMF NiTi VIM70 no estado bruto para aproximadamente 54°C no material reprocessado por PSPP.

Tabela 1. Temperaturas de transformação da LMF NiTi VIM70 bruta como recebida e reprocessada por PSPP com vazamento em diferentes tipos de moldes.

Barra\Temperatura ($^\circ\text{C}$)	M_f	M_i	R_f	R_i	A_i	A_f
Bruto com recebida	34,2	40,3	42,1	49,5	64,2	81,6
Molde de aço	-23,7	1,3	5,9	31,2	11,1	54,6
Molde de bronze	-14,6	-0,2	2,8	30,4	10,2	54,5
Molde de alumínio	-12,4	-1,2	3,1	27,2	19,3	53,2
Molde de cobre	-7,0	1,7	1,7	31,0	23,0	56,6

A aplicação do tratamento térmico de solubilização a 850°C nas barras bruta, como recebida pelo processo VIM, levou ao desaparecimento da transformação de fase na LMF NiTi, conforme pode ser observado pelos termogramas DSC apresentados na (Figura 5a).

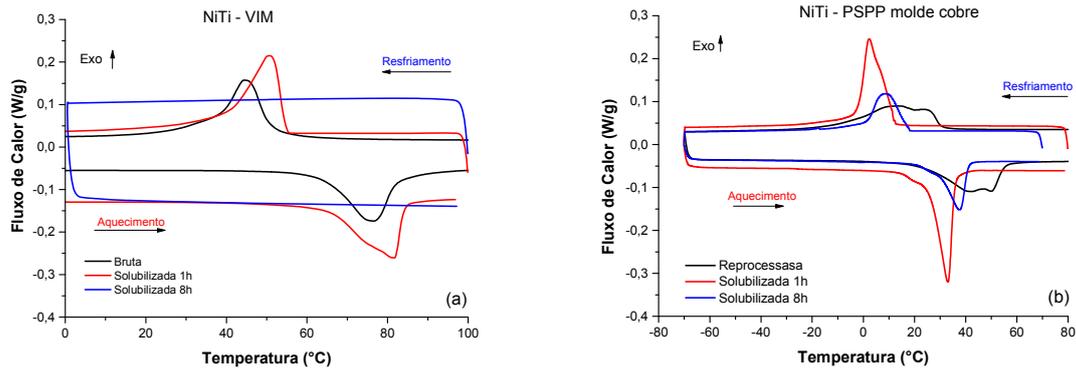


Figura 5. Termogramas DSC para a LMF NiTi. (a) Bruta por VIM. (b) Reprocessada por PSPP e vazada em molde de cobre.

Diferentemente, nas amostras solubilizadas que foram reprocessadas (Figura 5b), as transformações martensíticas permaneceram mesmo para o tempo mais longo de tratamento (8 h) e produziram uma redução significativa nas temperaturas de transformação com relação a LMF bruta (de 40 a 50°C). Ainda, para o material reprocessado, verifica-se uma suavização dos picos de transformação que inicialmente apresentavam distorções atribuídas provavelmente a solidificação rápida causada pelo reprocessamento PSPP. O mesmo comportamento qualitativo da (Figura 5) foi observado para todas as amostras reprocessadas e solubilizadas independentemente dos materiais de molde, bem como dos tempos de solubilização.

O comportamento das temperaturas de pico de transformação (M_p e A_p), respectivamente, durante o resfriamento e aquecimento para as amostras reprocessadas e solubilizadas, é mostrado na (Figura 6) em função dos metais dos moldes e tempos de solubilização. Verifica-se que estas propriedades térmicas apresentam variações limitadas a apenas 10°C, na comparação entre os diferentes tipos de moldes e tempos de solubilização, mostrando-se possível o controle dessas temperaturas, principalmente na garantia da temperatura final de transformação (A_f), que apresentou comportamento estável (Figura 7).

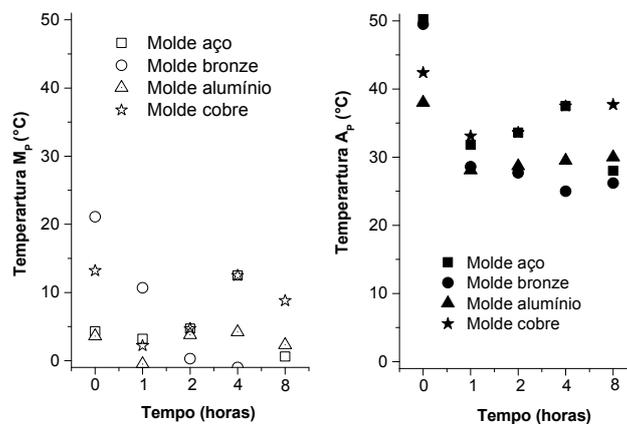


Figura 6. Temperaturas de pico durante resfriamento (M_p) e aquecimento (A_p) como uma função de diferentes tempos de solubilização e de moldes metálicos.

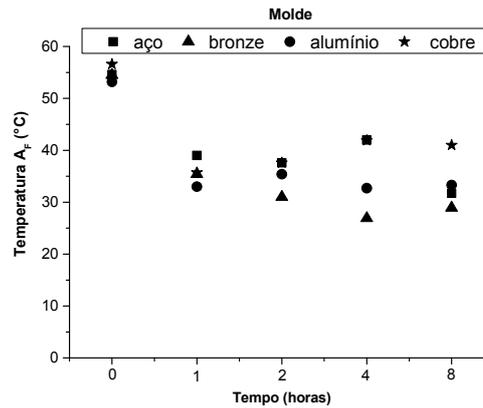


Figura 7. Temperatura de transformação final (A_r) em função de diferentes tempos de solubilização e moldes metálicos.

Considerando-se que as ligas de NiTi com efeito de memória de forma podem apresentar uma transformação de fase pré-martensítica durante o resfriamento, chamada fase R devido à sua estrutura romboédrica [3], os resultados mostraram que tanto o reprocessamento como a solubilização da liga não elimina a fase R. O aparecimento de um pico de resistência elétrica durante o resfriamento (Figura 8) confirma a presença dessa transformação de fase R nas amostras solubilizadas, não detectáveis por DSC. Esse comportamento foi observado para todos os moldes metálicos e tempos de solubilização empregados.

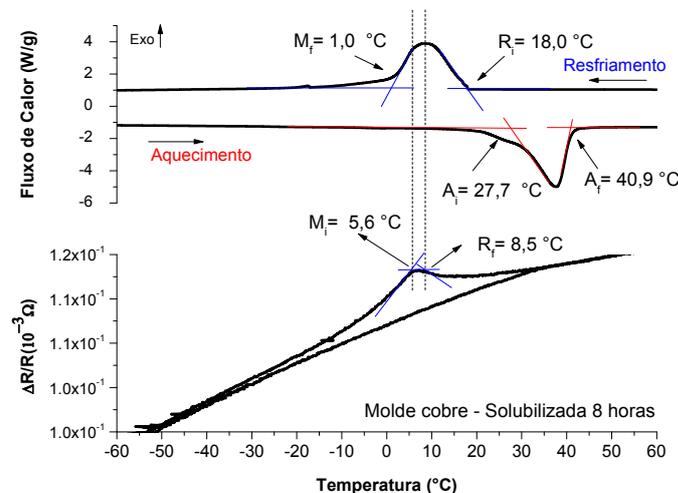


Figura 8. Termograma DSC (acima) e RET (abaixo) para o NiTi VIM70 reprocessado em molde de cobre e solubilizado durante 8h.

No que diz respeito às energias presentes nas transformações de fase e com referência à (Figura 9), durante o resfriamento e o aquecimento verifica-se uma diminuição da entalpia de transformação com o aumento do tempo de solubilização. Esta diminuição foi mais intensa na seguinte ordem de moldes metálicos: aço, latão, alumínio e cobre (condutividade térmica do molde). No entanto, os valores de 18 a 25 J/g observados para o tempo de solubilização de 1 hora são típicos para as LMF de NiTi [3]. O aumento do tempo de solubilização leva a uma diminuição das entalpias de transformação, que atingem valores situados entre 10 e 15 J/g.

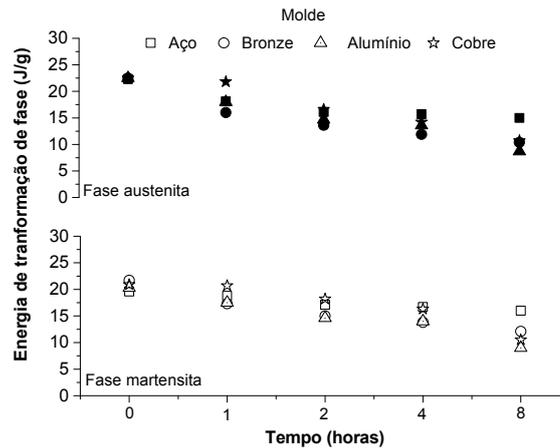


Figura 9. Entalpias de transformação durante o aquecimento e arrefecimento em função de diferentes tempos de solubilização e de metal moldes.

4 CONCLUSÃO

Este estudo revela o efeito do reprocessamento via PSPP e vazamento em diferentes moldes metálicos nas propriedades térmicas de transformação de fase uma LMF NiTi, originalmente produzido pelo processo de fusão por indução a vácuo. Verificou-se que a utilização de um molde de cobre permite a obtenção de barras injetadas com melhor acabamento superficial, especialmente em comparação com o molde fabricado em aço inoxidável. Para todos os moldes metálicos, verificou-se que a solidificação rápida produzida pela injeção do NiTi fundido proporciona alterações nas temperaturas de transformação de fase do material, que se refletem nos picos de DSC. Referindo-se a temperaturas de transformação (principalmente M_i e A_f), observa-se que o reprocessamento da liga NiTi estudada provoca uma diminuição de 20°C a 30°C destas temperaturas.

O efeito do tratamento térmico de solubilização na LMF NiTi bruta, obtida por VIM, foi proporcionar o desaparecimento da transformação martensítica a partir de um tempo de exposição maior que duas (2) horas. Nos materiais reprocessados por PSPP e solubilizados, é possível afirmar que as temperaturas de transformação da LMF NiTi, não desaparecem mas sofrem uma redução significativa (de 40 a 50 °C), em comparação com o material obtido por VIM. Os tratamentos de solubilização levam a uma suavização dos picos de transformação, originalmente distorcidos pelo reprocessamento PSPP. As temperaturas de transformação não foram significativamente afetadas pelo uso de qualquer tipo de molde metálico e tempo de solubilização. O tratamento de solubilização não foi capaz de eliminar a fase R, que esteve presente em todas as amostras estudadas por resistência elétrica em função da temperatura. As alterações mais observadas foram encontradas nas entalpias de transformação, que diminuem com o tempo de solubilização aumenta como uma função de 2^n horas ($n = 0, 1, 2, 3$).

Por fim, é possível controlar as temperaturas de transformação das LMF NiTi produzidas ou reprocessadas por PSPP, principalmente na garantia da temperatura final de ativação (A_f), que não apresentou alterações significativas com as variáveis estudadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo nº 574001/2008-5), Casadinho UFCG-UFRJ-ITA (Processo nº 552199/2011-7), Universal 14/2012 (Processo nº 474524/2012-4) e PQ 1D (Processo nº 304658/2014-6). A CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado ao primeiro autor (J. B. Simões).

REFERÊNCIAS

- 1 Lagoudas DC. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. Texas: Springer; 2008.
- 2 Elahinia, MH, Hashemia, M, Tabesha, M, Bhaduria, SB. Manufacturing and processing of NiTi implants: A review. Progress in Materials Science. Progress in Materials Science. 2012; 57: 911-946.
- 3 Otsuka K, Wayman CM. Shape Memory Materials. Cambridge: University Press, Cambridge UK; 1998.
- 4 Otubo J, Rigo OD, Moura Neto C, Kaufman MJ, Mei PR. Low carbon content NiTi shape memory alloy produced by electron beam melting Materials Research. 2005; 7: 263-267.
- 5 De Araújo CJ, Gomes AAC, Silva JA, Cavalcanti, AJT, Reis RPB, Gonzalez CH. Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push-pull process. Journal of Materials Processing Technology. 2009;20: 3657-3664.
- 6 Zhang Z, Frenzel J, Neuking K., Eggeler G. On the reaction between NiTi melts and crucible graphite during vacuum induction melting of NiTi shape memory alloys. Acta Materialia. 2005; 53: 3971-3985.
- 7 Zhang Z, Frenzel J, Neuking K, Eggeler G. Vacuum Induction Melting of Ternary NiTiX (X ¼ Cu, Fe, Hf, Zr) Shape Memory Alloys Using Graphite Crucibles. Materials Transactions. 2006; 47:661-669.
- 8 Kabiri Y, Kermanpur A, Foroozmehr A. Comparative study on microstructure and homogeneity of NiTi shape memory alloy produced by copper boat induction melting and conventional vacuum arc melting. Vacuum. 2012; 86:1073-1077.