



Tema: Materiais com efeito de memória de forma (Shape memory alloys)

MÉTODOS DE DEFINIÇÃO DAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO DE FASES EM LIGAS DE NiTi EQUIATÔMICA A PARTIR DE RESULTADOS DE DSC*

Patrícia Freitas Rodrigues¹
 Shimeni Baptista Ribeiro²
 Edir Neves Teixeira³
 Claudia Marques Fontanezzi⁴
 Andersan dos Santos Paula⁵

Resumo

Um comparativo entre dois métodos para determinação das temperaturas de transformação de fase, tendo como base análises de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) em amostras de uma liga de NiTi equiatômica submetida a tratamentos térmicos para envelhecimento, foram utilizados neste trabalho. Sendo aplicado o método clássico comumente utilizado para análise desses resultados e o método utilizando da integral do pico de transformação de fase. Com base nas avaliações feitas, o método de integral por apresentar uma relação direta da fração de transformação demonstra-se mais eficaz para determinar o início e o fim da transformação por levar em consideração a forma do pico em função da trajetória de transformação.

Palavras-chave: DSC; Temperatura de transformação de fase; Liga NiTi equiatômica; Tratamento térmico de envelhecimento.

METHODS DEFINITION OF THE PHASE TRANSFORMATION TEMPERATURES IN EQUIATOMIC NiTi ALLOYS FROM DSC RESULTS

Abstract

A comparison of two methods for determination of phase transformation temperatures, based on Differential Scanning Calorimetry (DSC) analyses in equiatomic NiTi alloy samples subjected to thermal treatments for aging, were used in this work. Being used the classic method commonly used for the analysis of these results and the method using associated to phase transformation peak integration. Based on the evaluations made, the integral method for presenting a direct relationship of the transformation fraction is demonstrated more effective by take into account in peak shape depending on the trajectory of transformation.

Keywords: DSC; Phase transformation temperatures; Equiatomic NiTi alloy; Aging heat treatment.

¹ Bacharel em Química Industrial, M.Sc., Professora do curso de Engenharia de Petróleo da UBM, Centro Universitário de Barra Mansa, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, M.Sc., Doutoranda em Engenharia Metalúrgica, EEIMVR, PPGEM, UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., EEIMVR, PPGEM, UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁴ Dentista, M.Sc., EEIMVR, PPGEM, UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁵ Engenheira Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professora Adjunta, EEIMVR, VMT e PPGEM, UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Algumas técnicas de análises termofísicas são utilizadas para observar e determinar as temperaturas de transformações de fase. Sendo a técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) um dos métodos diretos mais utilizados para determinação das temperaturas das transformações martensíticas termoelásticas induzidas termicamente, em geral, como é o caso das ligas de NiTi, e de calor específico, em particular.

As temperaturas de transformação de fase são geralmente observadas acima da temperatura ambiente para as ligas ricas em Ti, enquanto nas ricas em Ni se situam abaixo da temperatura ambiente [1]. Tendo a possibilidade de formação de até três fases nas ligas binárias e para algumas adições de elementos de liga: B2 (austenita) de mais alta temperatura, cúbica do tipo CsCl; fase-R (martensita) de temperatura intermediária, trigonal com distorção romboédrica; e B19' (martensita) de temperatura mais baixa, monoclinica.

Para interpretação desses resultados utiliza-se comumente o método clássico, onde se leva em consideração o ajuste da linha base dos picos de transformação obtidos nas análises de DSC, e determina-se os pontos de início, pico e fim associados as temperaturas de transformação de fase de cada pico [2]. No entanto, de acordo com a literatura no estudo de Paula, *et al.* (2004), foi utilizado um método de integral dos picos de transformação de fase que se fazem presentes na análise de DSC. Este método este que leva em consideração a toda a área do pico de temperatura de transformação de fase, onde Paula e colaboradores estudaram uma liga de NiTi rica em Ti em condições que haviam uma única etapa de transformação evidenciadas por um único pico tanto no aquecimento como no resfriamento ($B2 \leftrightarrow B19'$), em outros casos com múltiplas etapas de transformação no resfriamento com sobreposição do picos ($B2 \rightarrow R$; $B2 \rightarrow B19'$; $R \rightarrow B19'$) e finalmente com duas etapas de transformação no resfriamento sem sobreposição dos picos ($B2 \rightarrow R$; $R \rightarrow B19'$) devido a um intervalo pequeno de temperatura entre eles [3].

Motivado por este trabalho foi aplicado o método para avaliação de amostras de uma liga de NiTi equiatômica, na forma de chapa laminada a quente e posteriormente submetida a tratamento térmico de envelhecimento (Solubilização seguido de precipitação). Ligas estas que apresentam os picos de transformação de fase em intervalos de temperaturas inferiores as das ligas ricas em Ti, além de apresentarem dois picos de transformação ($B2 \rightarrow R$; $R \rightarrow B19'$) durante o resfriamento, com intervalo de temperatura entre eles superior a apresentando nas ligas ricas em Ti, e finalmente um único pico de transformação no aquecimento ($B19' \rightarrow B2$) em uma faixa de temperatura que sobrepõe o primeiro pico de transformação do resfriamento ($B2 \rightarrow R$) [4,5].

O presente trabalho visou confrontar resultados destes dois métodos, com base na temperatura de transformação de fase (início/1%, pico/50% e fim/99% de transformação) tendo como base análise de Calorimetria Diferencial de Varredura em condições selecionadas de amostras desta liga de NiTi equiatômica que apresenta picos de DSC com aspectos distintos (simétricos a assimétricos em relação ao ponto de máximo ou mínimo dos picos de transformação).

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

O material em estudo é uma chapa laminada a quente com temperatura de início próxima a 850°C para reduzir a espessura de 18 mm para 1,6 mm proveniente de uma liga Ni-Ti com 51%at.Ni (55%Ti, 0,05%C, 0,084%O em peso (p/p)) elaborada pelo professor e pesquisador Dr. Jorge Otubo do Instituto Tecnológica da Aeronáutica (ITA), Brasil. Em um trabalho prévio foi realizada o estudo da evolução estrutural e mecânica deste material submetidas a distintas etapas do tratamento de envelhecimento (solubilização a 850°C por 60 minutos, e três etapas de precipitação 500°C a interrompidos de 30 minutos em 30 minutos até atingir 90 minutos, onde na última etapa distinguiu-se a temperatura de encharque em 400, 450 e 500°C) [4,5]. O que permitiu selecionar algumas condições de interesse para os presentes trabalhos relacionadas as amostras denominadas de:

TT1 – Tratamento térmico de solubilização a 850°C por 60 minutos seguido de tratamento térmico de precipitação a 500°C por 30 minutos, e posterior resfriamento em água em ambos os tratamentos;

TT2 – Tratamento térmico de solubilização a 850°C por 60 minutos seguido de 2 etapas de tratamento térmico de precipitação a 500°C por 30 minutos, e posterior resfriamento em água em todos os tratamentos;

TT3 – Tratamento térmico de solubilização a 850°C por 60 minutos seguido de 3 etapas de tratamento térmico de precipitação a 500°C por 30 minutos, e posterior resfriamento em água em todos os tratamentos.

2.2 Métodos

Após corte de precisão com disco adiantado, foram extraídas amostras com massa entre 30 a 40 mg para análise de DSC, que após o corte foram previamente submetidas à decapagem ácida com uma solução de 45 ml de HNO₃ (ácido nítrico), 45 ml de H₂O (água destilada) e 10 ml HF (ácido fluorídrico), por aproximadamente 60 minutos de imersão. O equipamento de DSC utilizado era da marca Netzsch modelo 404 C/1/G, Pegasus (instalado no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica do ITA), com forno de baixa temperatura (-150°C a 600°C), com ciclos térmicos entre -80°C e 150°C e taxa de aquecimento e resfriamento de 5°C/min.

Para análise dos resultados foi realizada a comparação de dois métodos para comparação das temperaturas de transformação de fase. Sendo o método I aquele aplicado diretamente nos picos apresentados e os métodos II realizando, além de um ajuste de linha base, uma posterior integração da área associada a fração transformada com auxílio do software Microsoft Excel [3], respectivamente.

No primeiro método denominado como método clássico (ou Método I) [4], as temperaturas de início e fim de transformação são obtidas a partir do ajuste da linha base com interceptação de retas associadas às regiões lineares de início e fim do pico, respectivamente, e as temperaturas de pico associadas ao ponto de máximo (reação exotérmica) ou mínimo (reação endotérmica) de cada pico, como apresentado na Figura 1.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

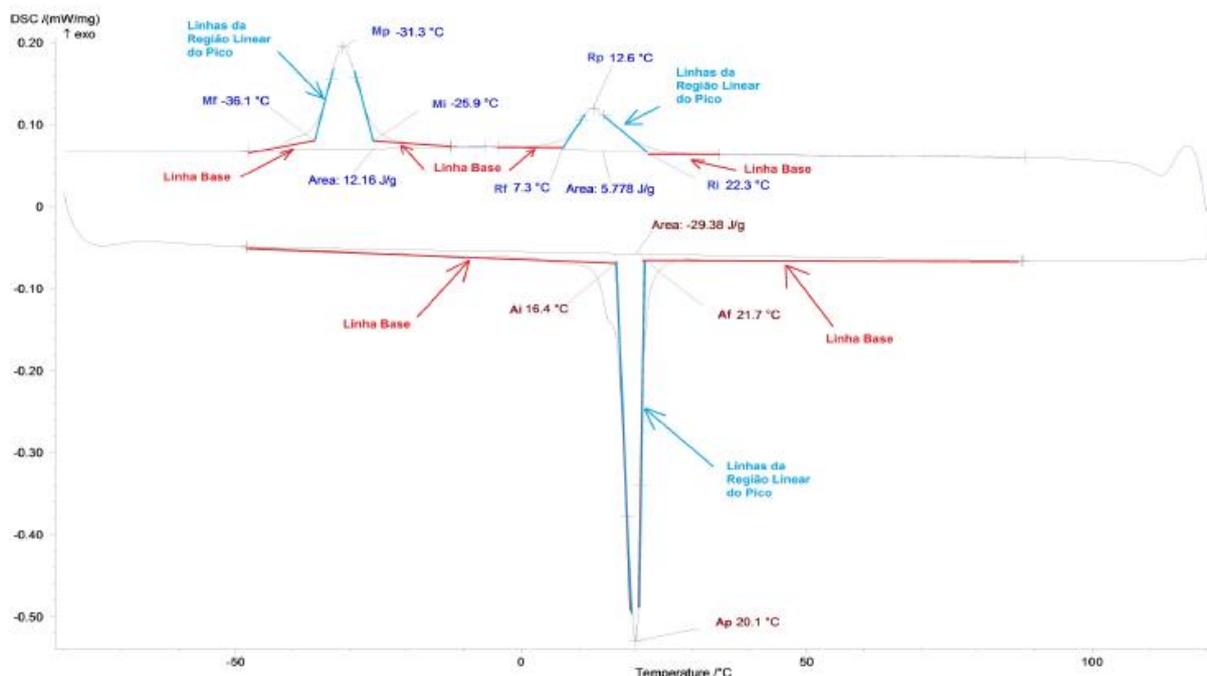


Figura 1. Exemplo da definição das temperaturas transformação para o início (A_i , R_i e M_i), de pico (A_p , R_p e M_p) e de fim (A_f , R_f e M_f), com base no Método I [4].

O segundo classificado como método Excel (ou Método II, conforme Figura 2) [4] apresenta os valores das temperaturas de início e fim da transformação após o cálculo da integral da curva associada ao pico de transformação considerando 1% e 99% da fração transformada com relação as respectivas temperaturas de transformação. Além dos valores de 50% da fração transformada a fim de se comparar com as temperaturas de pico obtidas pelo Método I.

Com base na Figura 2, essas frações são determinadas a partir de uma relação da Energia, determinada pela variação de temperatura de um dado ponto, multiplicada pelo somatório do fluxo de calor até o mesmo ponto, e finalmente dividido por dois, admitindo assim que cada “fatia” analisada no pico, por intervalos de variação de temperaturas são áreas semelhantes a trapézios. Assim, conseguimos determinar a fração transformada absoluta (Fração transf (abs)) pelo somatório da energia até o dado ponto, e a fração relativa (Fração transf (rel)) com o somatório da energia até o dado ponto dividido pela energia do pico em questão, como exemplificado pelas equações exemplificadas na Figura 2 e os destaques da planilha de Excel exemplificada e relacionada pela Figura 2, sendo exemplificado pelas cores verde, temperatura de início da transformação em verde (associada a 1% da fração transformada), temperatura de 50% da transformação em vermelho (associada a 50% da fração transformada), e temperatura de fim da transformação em azul (associada a 99% da fração transformada), valores este em destaque em amarelo na planilha apresentada na Figura 2.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Fração	Temperatura de Transformação da Austenita	Energia (mV Calor Espec
0,1%	5,43009	
1,0%	10,45442	
10,0%	15,47876	
50,0%	18,49337	
90,0%	20,5031	
99,0%	23,5177	
99,9%	26,53231	

Temperatura (°C)	Fluxo (mW/mg)	Energia (mW/g)	Calor Específico (mW/°C/g)	Fração Transformada (abs)	Fração Transformada (rel)
4,42522	0	0	0	0	0
5,43009	-0,00125	-1,3E-06	6,28E-07	7,53653E-06	6,28E-07
6,43495	0,00217	2,3E-06	4,79E-06	2,05407E-06	2,3E-06

$$\text{Energia} = \frac{\Delta(\text{Temperatura} (i)) * \Sigma (\text{Fluxo} (i))}{2}$$

$$\text{Fração Transf (abs)} = \Sigma \text{Energia} (i)$$

$$\text{Fração Transf (rel)} = \frac{\Sigma \text{Energia} (i)}{\text{Energia (pico)}}$$

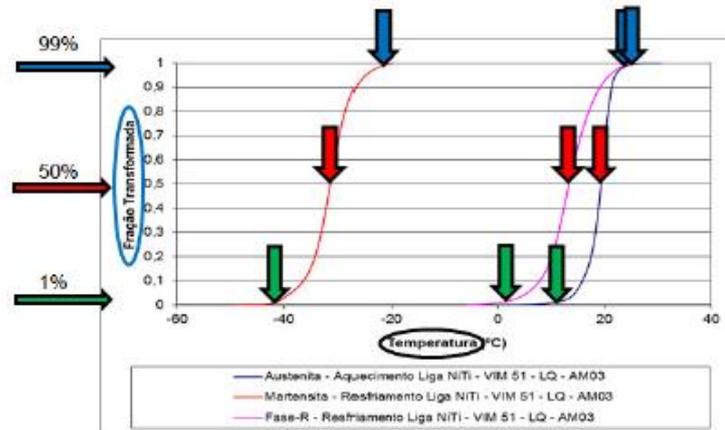


Figura 2. Detalhamento do Método II para definição das temperaturas transformação para o início (1% - A_i , R_i e M_i), metade (50% - $A_{50\%}$, $R_{50\%}$ e $M_{50\%}$) e de fim (99% - A_f , R_f e M_f) [4].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados e discutidos nesta seção referem-se a uma análise comparativa dos valores obtidos para a determinação das temperaturas de transformação de fases entre as amostras com tratamento de envelhecimento da liga em estudo, com base no método I e método II descrito na seção de Materiais e Métodos e aplicados aos resultados de DSC.

A figura 3 apresenta as curvas de DSC para as três amostras, relacionadas a liga de NiTi equiatômica, definidas para este estudo. Pelas curvas de DSC verifica-se que as três amostras em estudo apresentam transformação em duas etapas no resfriamento ($B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$) e em uma etapa no aquecimento ($B19' \rightarrow B2$).

Com base nos picos de transformação de fase apresentados nos resultados da análise de DSC as três amostras em estudo, nas condições envelhecidas selecionadas, apresentam transformação direta em duas etapas ($B2 \rightarrow R$; $R \rightarrow B19'$), no resfriamento, e uma transformação inversa em uma única etapa ($B19' \rightarrow B2$), no aquecimento, com base no que foi reportado em estudo prévio [4] e em concordância com o comportamento de ligas de composições similares envelhecidas a curtos tempos [1,6-8].

Tendo como base as linhas tracejadas verticais (fixadas a 20°C) apresentadas em cada um dos gráficos apresentados na Figura 3, verifica-se um deslocamento para temperaturas superiores dos picos de transformação de fase com aumento do tempo de encharque nos tratamentos térmicos de precipitação adotados nas amostras em estudo. Ou seja, simplesmente 30 minutos de encharque no tratamento térmico de precipitação (amostra TT1 – Figura 3a) implica em uma condição estrutural completamente austenítica ($B2$) a temperatura ambiente e as transformações martensítica ($B2 \rightarrow R$ e $R \rightarrow B19'$) em temperaturas inferiores a esta. Enquanto os

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

incrementos de duas e três etapas de 30 minutos no tratamento térmico de precipitação faz com a temperatura ambiente tenha-se um misto de austenita (B2) e fase martensítica (R e/ou B19') com incremento da fração volumétrica das fases martensítica em função do incremento do acúmulo do tempo de encharque com as etapas do tratamento térmico de precipitação.

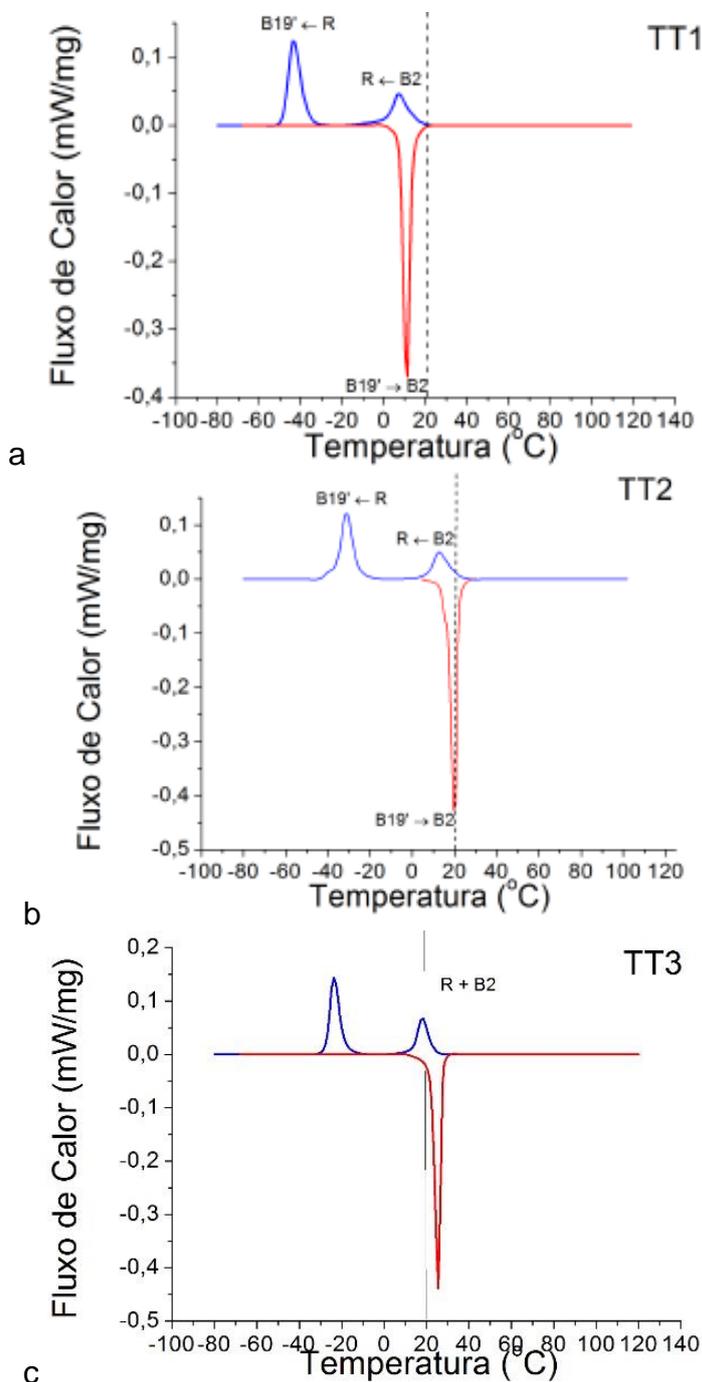


Figura 3. Gráficos de DSC das amostras (a) TT1, (b) TT2, e (c) TT3. Gráfico de DSC para amostra TT1, a linha tracejada indica a temperatura ambiente.

A Tabela 1 apresenta os valores das sequências das transformações de fases definidas pela análise de DSC e as temperaturas de transformação de fase definidas pelos Métodos Clássico (Método I) e Excel (Método II), os respectivos valores em

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

módulo que distinguem os valores obtidos em cada método, com base nas curvas de DSC apresentadas nos gráficos da Figura 3. Pode-se observar que o método II apresenta valores mais próximos de início apresentado a 1% de transformação e fim apresentado a 99% da transformação de fase, isso por não depender da forma do pico como ocorrido no método I. Ao comparar os resultados, de acordo com os valores de método clássico e o método da integral de picos (excel) pode-se observar que o método clássico apresenta valores de início e fim de transformação associada a uma quantidade de fase pré-existente e não completamente transformada quando comparada a valores do método de integral de picos (excel).

Em conjunção a isto, a Figura 4 traduz de maneira gráfica os valores das temperaturas de transformação de fase definidas pelos métodos propostos. Com base nos valores apresentados pelas Tabela 1 e Figura 4, verifica-se que:

- os valores para temperaturas pico (A_p , R_p e M_p – Método I) e de 50% da fração transformada ($A_{50\%}$, $R_{50\%}$ e $M_{50\%}$ - Método II) apresentam muito próximos (mínimo de 0,1°C e máximo 1,6°C);
- os valores associadas as temperaturas de início da transformação (A_i , R_i e R_i – Métodos I e II) tende-se aumentar a diferença entre os métodos com aumento do tempo de encharque no tratamento térmico de precipitação (amostras TT1 → TT2 → TT3). Apresentando valores mínimos para as transformações associadas a B2→R (entre 0,2 a 1,2°C para R_i), e valores máximos para as transformações associadas a B19'→B2 (entre 4,2 a 6,7 para A_i).
- os valores associados as temperaturas de fim da transformação (A_f , M_f e R_f – Métodos I e II) apresentam diferenças distintas entre os métodos sem uma correlação bem definida de incremento ou decréscimo com base nos tratamentos adotados.

Tabela 1. Sequências e temperaturas de transformação de fase determinada pelos Métodos I (Método Clássico) e II (Método Excel).

Amostras / Método		Sequência e Temperaturas de Transformação de Fases (°C)								
		Aquecimento			Resfriamento					
		B19' → B2			B2 → R			R → B19'		
		A_i	$A_{p/50\%}$	A_f	R_i	$R_{p/50\%}$	R_f	M_i	$M_{p/50\%}$	M_f
TT1	I	7,6	11,2	13,5	15,7	7,1	1,6	-37,0	-43,8	-48,8
	II	3,4	10,4	17,5	15,5	6,4	-11,7	-33,8	-42,8	-49,8
	(II-I)*	4,2	0,8	4,0	0,2	0,7	13,3	3,2	1,0	1,0
TT2	I	16,4	20,1	21,7	22,3	12,6	7,3	-25,9	-31,3	-36,1
	II	10,5	18,5	23,5	23,5	12,5	-0,6	-20,7	-31,6	-41,8
	(II-I)*	5,9	1,6	1,8	1,2	0,1	7,9	5,2	0,3	5,7
TT3	I	22,2	25,7	27,3	23,7	18,1	13,7	-18,6	-23,8	-27,4
	II	15,5	24,5	28,5	24,5	17,5	5,4	-13,7	-23,7	-29,7
	(II-I)*	6,7	1,2	1,2	0,8	0,6	8,3	4,9	0,1	2,3

Com base no Método II: i = 1% transformado; p = 50% transformado; f= 99% transformado.

* - Valor absoluto.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

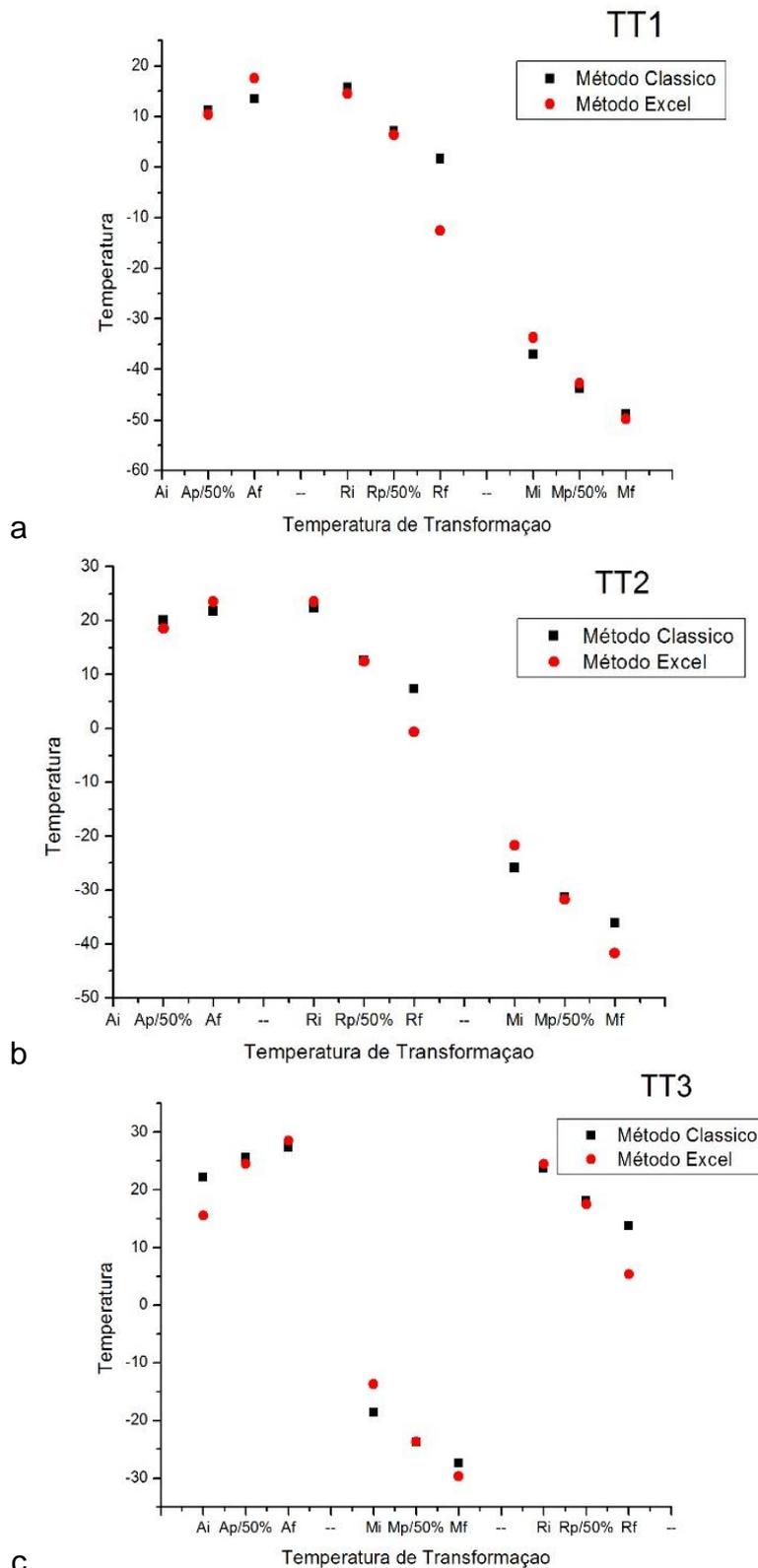


Figura 4. Gráfico comparativo das temperaturas de transformação de fase definidas pelos Métodos Clássico (Método I) e Excel (Método II) para as amostras (a) TT1, (b) TT2, e (c) TT3.

Além do deslocamento dos picos de transformação de fases para temperaturas mais elevadas, o que resulta num incremento em todas as temperaturas de transformação de fases em ambos os métodos analisados (Figuras 1 e 2, e Tabela 2). Também verifica-se um aumento na simetria dos picos, principalmente para a transformação

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

de B2→R, que pode ser evidenciado pela diferença entre as temperaturas de início e de pico (ou 50% transformada) quando comparada a diferença entre as temperaturas de pico (ou 50% transformada) e de fim de transformação, conforme é numericamente reportado na Tabela 2. Sendo esta simetria melhor revelada com base nos valores das temperaturas de transformação definidas pelo Método II.

Tabela 2. Avaliação da Simetria dos Picos com base nas temperaturas de transformação de fase determinada pelos Métodos I (Método Clássico) e II (Método Excel).

Amostras / Método		Sequência e Simetria do Pico de Transformação (°C)					
		Aquecimento		Resfriamento			
		B19' → B2		B2 → R		R → B19'	
		A _i -A _p	A _p -A _f	R _i -R _p	R _p -R _f	M _i -M _p	M _p -M _f
TT1	I	-3,6	-2,3	8,6	5,5	6,8	5,0
	II	-7,0	-7,1	9,1	18,1	9,0	7,0
	(II-I)*	3,4	4,8	0,5	12,6	2,2	2,0
TT2	I	-3,7	-1,6	9,7	5,3	5,4	4,8
	II	-8,0	-5,0	11,0	13,1	10,9	10,2
	(II-I)*	4,3	3,4	1,3	7,8	5,5	5,4
TT3	I	-3,5	-1,6	5,6	4,4	5,2	3,6
	II	-9,0	-4,0	7,0	12,1	10,0	6,0
	(II-I)*	5,5	2,4	1,4	7,7	4,8	2,4

Com base no Método II: i = 1% transformado; p = 50% transformado; f = 99% transformado.

* - Valor Absoluto.

Uma característica funcional destas ligas, além das temperaturas de transformação, é a histerese de transformação, a qual pode ser medida entre as diferenças entre as temperaturas de início (A_i-R_i, ou A_i-M_i) ou de fim (A_f-R_f, ou A_f-M_f) das transformações para formação de fase R ou B19' a partir da fase austenítica (B2). Dessa forma, tendo em vista que a histerese de transformação também é fortemente influenciada pelo método de definição das temperaturas de transformação de fase.

Tabela 3. Histerese de transformação de fase determinada pelos Métodos I (Método Clássico) e II (Método Excel).

Amostras/Métodos		Histerese de Transformação (°C)			
		A _i -R _i	A _f -R _f	A _i -M _i	A _f -M _f
TT1	I	-8,1	11,9	44,6	62,3
	II	-12,1	29,2	37,2	67,3
	(II-I)*	4,0	17,3	7,4	5,0
TT2	I	-5,9	14,4	42,3	57,8
	II	-13,0	24,1	31,2	65,3
	(II-I)*	7,1	9,7	11,1	7,5
TT3	I	-1,5	13,6	40,8	54,7
	II	-9,0	23,1	29,2	58,2
	(II-I)*	7,5	9,5	11,6	3,5

Com base no Método II: i = 1% transformado; p = 50% transformado; f = 99% transformado.

* - Valor absoluto.

Somado a isto, com base no preceito que o Método II (Tabela 3) apresenta valores de histerese de transformação para aplicação desta liga mais próximos aos valores relacionados ao início apresentado a 1% e fim apresentado a 99% da transformação.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

4 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados alcançados usando os métodos Clássico (Método I) e Excel (Método II), constatou-se que os métodos aplicados foram eficazes no entanto os resultados o método II, que se embasa na integral de picos, apresentou-se mais eficaz uma vez que seus valores não dependem do formato do pico no resultado do DSC, levando em consideração seu trajeto logo sua fração de transformação. O método clássico leva em consideração o formato do pico sendo seu aspecto assimétrico influenciável em seus resultados, apresentando este uma variação maior, afastando-se assim dos valores indicados para início 1% e fim a 99% de transformação. O método da integral de picos apresenta valores mais próximos aos observados para transformação de início a 1% e fim a 99% e ainda sendo possível prever a porcentagem da fase presente em relação a temperatura desejada. Sendo inferior seu erro percentual de fase existente em determinados pontos. Além disso, os valores encontrados para 50% da transformação são muito próximos as valores das temperaturas de pico, definidos no Método Clássico.

Agradecimentos

Os autores P.F.R., S.B.R., C.M.F. e A.S.P agradecem à Faperj e a CAPES pelo suporte financeiro (APQ-1 2009/02 E-26/110.414/2010), bolsa de doutorado (S.B.R. e C.M.F.) ao ITA pelo fornecimento do material e realização da análise de DSC nas amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 Otsuka K, Wayman CM. Shape Memory Materials. Cambridge University Press; 1998
- 2 Buehler WJ, Gilfrich JV, Wiley RC. Effect of low temperature phase changes the mechanical properties of alloys near composition of NiTi. Journal of Applied Physics. 1963;34:1475-84.
- 3 Braz Fernandes FM, Paula AS, Canejo J, Mahesh KK, Silva RJC. Kinetics characterization of martensitic transformation on Ti-rich NiTi SMA. In: Anais do SMST 2004; 3 a 7 de outubro de 2004; Baden-Baden, Alemanha. SMST; 2006. p.51-56.
- 4 Rodrigues PF. Evolução estrutural e das transformações de fase em uma liga de NiTi equiatômica laminada a quente submetida a tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento em tempos curtos [dissertação de mestrado]. Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense; 2012.
- 5 Rodrigues PF, Ribeiro SB, Paula AS, Fontanezzi CH, Bernardi HH, Otubo J. Evolução estrutural das transformações de fase em uma liga de ni-ti equiatômica submetida ao tratamento de envelhecimento em tempos curtos. In: Anais do 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2012.
- 6 Wiggers WS. Efeito do tempo de tratamento térmico de fios de NiTi conformados a frio na temperatura final de transformação austenítica [dissertação de mestrado]. Florianópolis: UFSC; 2011.
- 7 Paula AS. Tratamentos termomecânicos de ligas do sistema NiTi: caracterização estrutural e otimização das propriedades associadas ao efeito de memória de forma [tese de doutorado]. FCT/UNL; 2006.
- 8 Santos CN. Tratamentos Termomecânicos de Aços Fe-C-Si-Mn Assistidos Pelo Efeito TRIP [dissertação de mestrado]. Instituto Militar de Engenharia; 2005.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.