

# TESTES EXPERIMENTAIS EM FIOS DE MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA (NITINOL)<sup>1</sup>

Marcos Motta de Souza<sup>2</sup>  
Max Suell Dutra<sup>3</sup>  
Armando Carlos de Pina Filho<sup>4</sup>

## Resumo

O objetivo do trabalho aqui apresentado é estabelecer algumas características de fios de material com memória de forma (o chamado Nitinol), quando os mesmos são submetidos a uma carga axial constante e aquecidos eletricamente. Considerando amostras de fios com 1 m de comprimento e diâmetros de 100 e 150 microns, foram realizados testes para avaliação da repetibilidade, reprodutibilidade, histerese e incerteza de medição, utilizando-se para isso uma instalação experimental, possibilitando a realização de medições no ar. A partir dos resultados de leituras, observou-se um comportamento não-linear, com presença de histerese. Os resultados em relação à repetibilidade e reprodutibilidade foram satisfatórios, quando comparados a outras pesquisas similares. As incertezas expandidas encontradas para fios com essa dimensão já eram esperadas.

**Palavras-chave:** Liga com memória de forma; Deslocamento; Planilha de incerteza.

## EXPERIMENTAL TESTS IN WIRES OF SHAPE MEMORY MATERIAL (NITINOL)

### Abstract

The objective of the work presented here is to establish some characteristics of wires of shape memory alloy (Nitinol), when the same ones are submitted to a constant axial load and electrically heated. Taking in consideration wire samples with length 1 m and diameters 100 and 150 microns, tests for evaluation of the repeatability, reproducibility, hysteresis and uncertainty of measurement were performed, using for this an experimental installation, making possible the accomplishment of measurements in air. From the results of readings, a nonlinear behavior was observed, with presence of hysteresis. The results in relation to the repeatability and reproducibility were satisfactory, when compared with other similar research. The expanded uncertainties found for wires with this dimension already were waited.

**Key words:** Shape memory alloy; Displacement; Uncertainty budget.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *M.Sc. Marcos Motta de Souza, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Inmetro, Av. N. Sra das Graças, 50, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

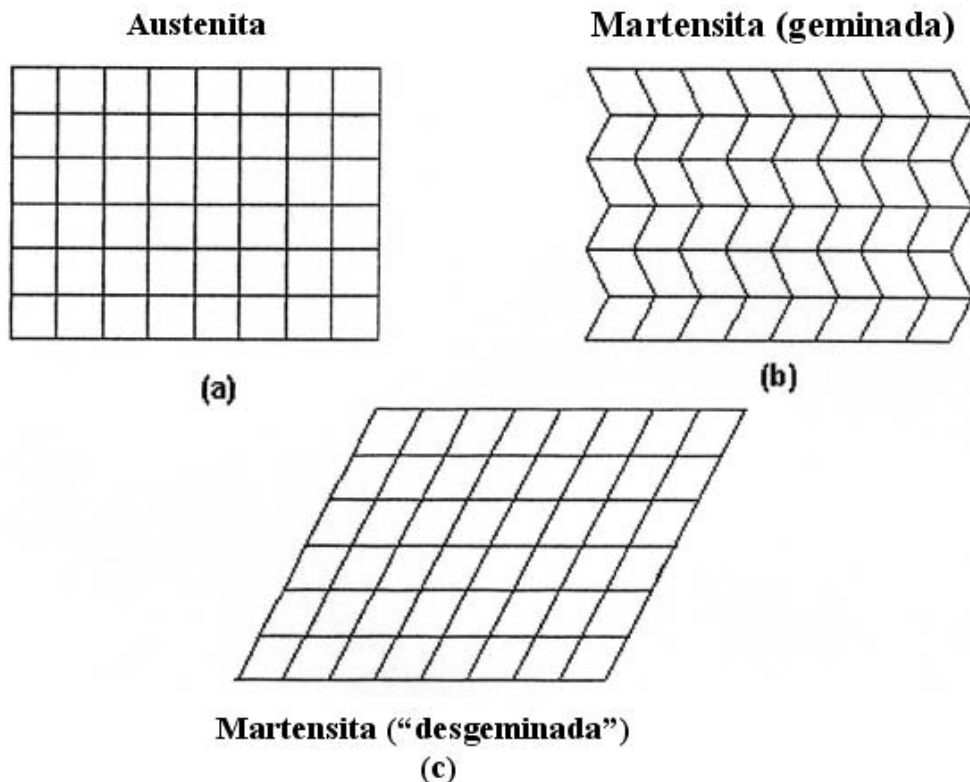
<sup>3</sup> *Dr.-Ing. Max Suell Dutra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/PEM, Programa de Engenharia Mecânica, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>4</sup> *D.Sc. Armando Carlos de Pina Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Expressão Gráfica, Ilha do Fundão, CEP. 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

# 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Otsuka e Wayman,<sup>(1)</sup> o efeito de memória de forma foi relatado pela primeira vez em 1932 por A. Ölander, o qual descobriu o comportamento pseudoelástico da liga de Au-Cd. Em 1938, Greninger e Mooradian<sup>(2)</sup> observaram o aparecimento e o desaparecimento de uma fase martensítica numa liga de Cu-Zn, ao aumentar e diminuir sua temperatura. O fenômeno básico do efeito memória do comportamento termoelástico da fase martensítica foi amplamente divulgado por Kurdjmov e Khandros,<sup>(3)</sup> em 1949, e também por Chang e Read,<sup>(4)</sup> em 1951. Finalmente, em 1967, Buehler<sup>(5)</sup> e seus colaboradores do U.S. Naval Ordnance Laboratory descobriram o efeito memória em uma liga de níquel e titânio equiatômica, o que pode ser considerado como o aparecimento do campo de materiais com memória de forma. A esta liga foi dado o nome de Nitinol (Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory).

O efeito memória de forma ocorre devido à temperatura e a tensão, condicionado a mudança da estrutura em forma de cristal do material entre duas fases diferentes: a martensítica e a austenítica. Martensítica é a fase de temperatura baixa e mais maleável, já a austenítica é a fase de temperatura alta e mais rígida. O efeito memória de forma funciona do seguinte modo: se uma barra de SMA está na sua fase austenítica (alta temperatura) e resfria até abaixo da temperatura de transição, a estrutura em forma de cristal irá mudar para martensítica (baixa temperatura). Se esta barra for deformada plasticamente por uma carga e aquecida acima da temperatura de transição ela retorna a seu tamanho inicial. Deformações da ordem de 6 a 8% podem ser totalmente restauradas. Para um melhor entendimento deste mecanismo, podem-se observar os desenhos esquemáticos da Figura 1.



**Figura 1.** Arranjo cristalino do material durante o efeito memória de forma.<sup>(6)</sup>

O presente trabalho tem por objetivo determinar a repetibilidade,<sup>(7)</sup> a reprodutibilidade, a histerese e a incerteza de medição do deslocamento de um fio da liga de Níquel e Titânio (NiTi), submetido a uma carga axial, ao ser eletricamente aquecido. Um dispositivo foi construído para realizar os ensaios nos fios com diâmetros de 100  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , com comprimento de 1 m, sendo as medições realizadas no ar. Foi utilizado um comparador eletrônico de deslocamento para as leituras do deslocamento.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para caracterizar este material foi necessário construir um dispositivo, elaborar um procedimento, determinar um modelo matemático e desenvolver uma planilha de incerteza.<sup>(8,9)</sup> Todos os detalhes estão descritos nesta seção.

### 2.1 Descrição do Dispositivo Experimental

O suporte do dispositivo experimental (Figura 2) foi construído em madeira revestida com fórmica (Figura 2a) e possui pés ajustáveis, no qual foi aparafusada a estrutura de aço galvanizado de fixação do suporte do fio de NiTi e dos suportes das polias. Foi utilizada uma cobertura de acrílico de 8 mm.

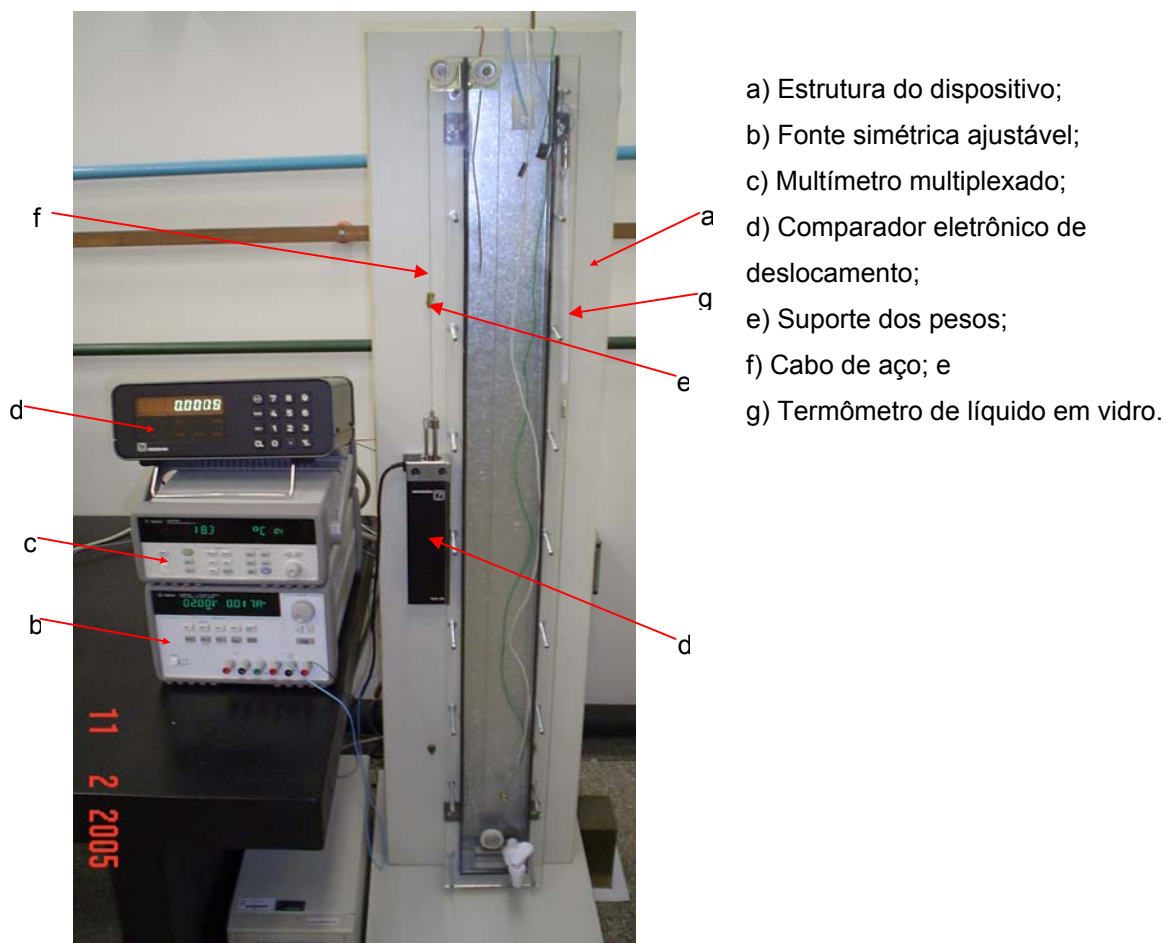


Figura 2. Dispositivo experimental.

O comparador eletrônico de deslocamento (Figura 2d) foi aparafusado na estrutura de madeira, deixando espaço para colocação dos pesos de chumbo. O fio de NiTi foi fixado ao suporte de teflon, entre duas arruelas de latão, por um parafuso. O fio de alimentação da corrente foi fixado no mesmo suporte.

O mecanismo de funcionamento consiste de quatro componentes principais: um fio atuador de NiTi, pesos (Figura 2e), um sensor e a estrutura. Os atuadores medidos são fios de NiTi com 1 m de comprimento e diâmetros de 100 e 150  $\mu\text{m}$ , que em um lado estão conectados a um suporte de teflon e do outro a um cabo de aço revestido com material isolante (Figura 2f). O suporte está preso à estrutura de aço galvanizado através de um parafuso. A conexão entre o cabo e os pesos é feita através de polias. Ao fio de NiTi estão conectados os fios provenientes da fonte digital simétrica ajustável (Figura 2b). A corrente (mA) injetada ocasiona o aquecimento do fio, que contrai e puxa o êmbolo do comparador eletrônico de deslocamento, indicando o comprimento deslocado. Ao retirarmos a corrente (mA), os pesos tensionam o fio, que retorna à posição inicial. No início do processo, o fio é submetido a uma tensão prévia pelos pesos e o comparador eletrônico de deslocamento foi “zerado” após esta tensão.

## 2.2 Descrição do Método de Medição

As medições foram realizadas em dez pontos distribuídos entre zero e o limite de corrente estabelecido pelo fabricante do fio, nas medições no ar (Tabela 1).

**Tabela 1.** Propriedades do fio de NiTi como atuadores.

Diâmetro do fio ( $\mu\text{m}$ )	Resistência (Ohms/m)	Corrente a temperatura ambiente (mA)	Carga máxima de regeneração (N)	Carga máxima de regeneração recomendada (N)
100	150	180	4,69	1,50
150	50	400	10,56	3,30

Foram realizados 12 ciclos de medição. Em cada ponto, após a aplicação da corrente aguardava-se a estabilização em micrômetros da deformação, acarretando um tempo médio no sentido crescente e decrescente de aproximadamente 17 minutos, para cada ciclo.

A contração do fio foi medida por um comparador eletrônico de deslocamento com faixa nominal de 100 mm e resolução de 0,005 mm. A corrente foi gerada por uma fonte digital de saída simétrica com capacidade de 0 V a 50 V e 1 A. Já as leituras de tensão, corrente, resistência e temperatura ambiente dentro do dispositivo foram efetuadas no multímetro digital multiplexado (Figura 2c), de 6  $\frac{1}{2}$  dígitos.

Foi utilizada uma carga de regeneração de 1,58 N para o fio de 100  $\mu\text{m}$  e de 3,00 N para o fio de 150  $\mu\text{m}$ .

A temperatura ambiente foi medida em um termômetro de líquido em vidro (Figura 2g) e a temperatura média durante todos os ciclos variou de 19,9°C a 20,5°C. A temperatura do fio foi medida por um termistor.

## 2.3 Equações Matemáticas

Até agora não existe um modelo matemático ideal para as ligas de material com memória de forma, portanto foi feita uma regressão linear a fim de determinar as

incertezas de medição dos fios. As equações de propagação dos fios de 100  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$  foram desenvolvidas, sendo a equação da propagação das incertezas do fio de 100  $\mu\text{m}$  no ar dada por:

$$L_T = 0,0008T^3 - 0,0526T^2 + 1,2594T + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8$$

Enquanto a equação da propagação das incertezas do fio de 150  $\mu\text{m}$  no ar é:

$$L_T = -0,0026T^3 + 0,3452T^2 - 12,785T + 141,81 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8$$

onde:  $L_T$  deslocamento total corrigido;  
 $E_1$  erro de repetibilidade;  
 $E_2$  erro do certificado de calibração do comparador eletrônico de deslocamento;  
 $E_3$  erro do certificado de calibração do termistor;  
 $E_4$  erro do certificado de calibração do termômetro de líquido em vidro;  
 $E_5$  erro devido à resolução do comparador eletrônico de deslocamento;  
 $E_6$  erro devido à resolução do termistor;  
 $E_7$  erro devido ao valor de uma divisão do termômetro de líquido em vidro;  
 $E_8$  erro devido ao desalinhamento do sistema.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizar todas as medições, e utilizando as equações fornecidas anteriormente, obteve-se os resultados a seguir. Na Figura 3 está apresentada a relação entre a temperatura do fio e o deslocamento na amostra de NiTi de 100  $\mu\text{m}$  nas medições no ar.

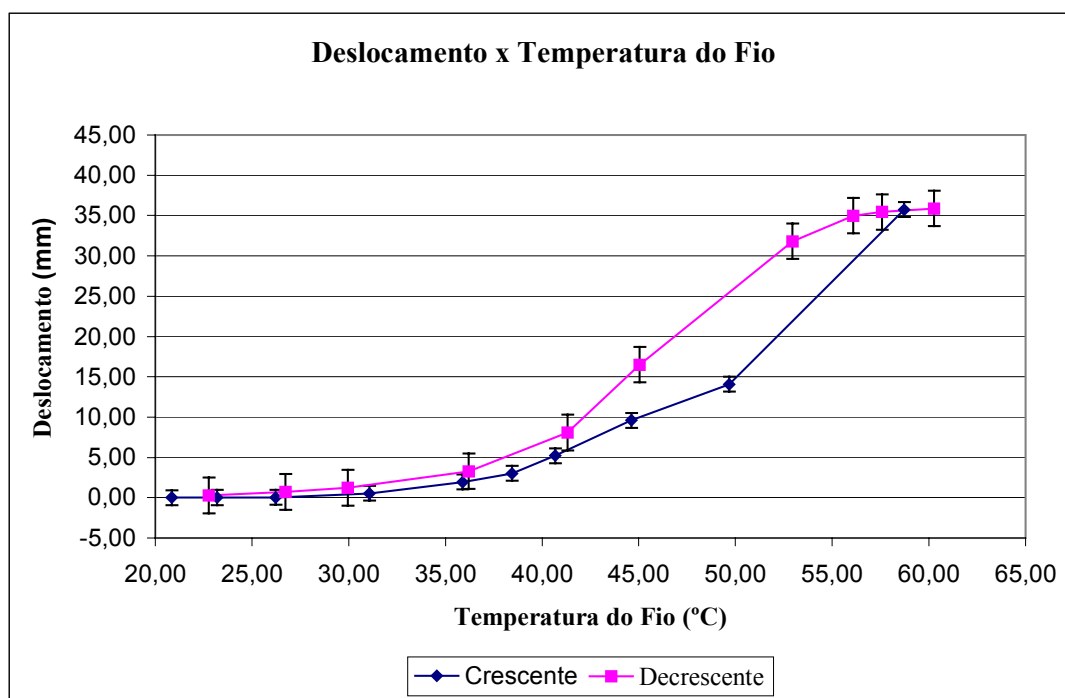


Figura 3. Deslocamento x Temperatura do fio de 100  $\mu\text{m}$  no ar.

Através da análise das leituras crescente e decrescente da temperatura, verifica-se neste gráfico que a histerese variou de 1,6°C até 12,3°C e o deslocamento variou de 0 mm a 35,87 mm, ou seja, -3,6% do comprimento total do fio testado. A incerteza de medição do deslocamento é de 0,93 mm para o sentido crescente e de 2,20 mm para o decrescente. A Tabela 2 representa a planilha de incerteza para o fio de 100 µm, sentido crescente.

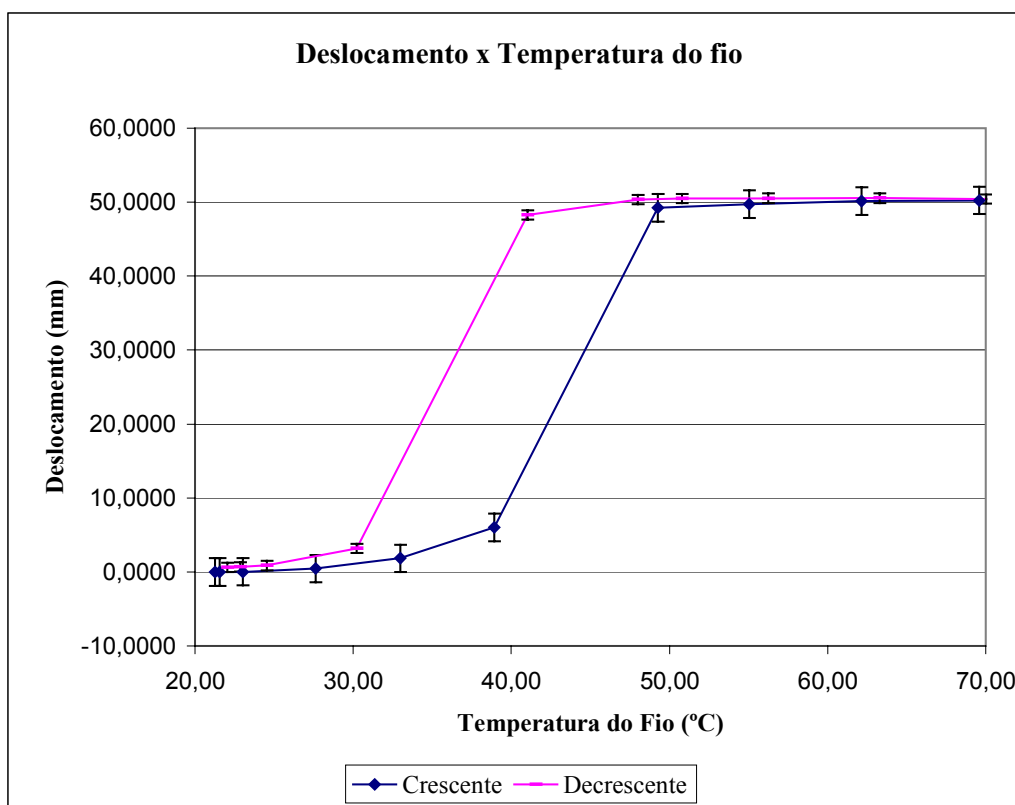
**Tabela 2.** Planilha de incerteza para o fio de 100 µm, sentido crescente.

Grandeza	Estimativa	Incerteza Padrão	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$		$c_i$	$u_i(y)$
$D_{rep}$	35,7559	0,398	Normal	1,00	0,398
$C_{ced}$	0,005 mm	0,002	Normal	1,00	0,003
$C_{ter}$	1 °C	0,400	Normal	0,57	0,227
$C_{tlv}$	0 °C	0,015	Normal	0,57	0,008
$R_{ced}$	0,005 mm	0,001	Retangular	1,00	0,001
$R_{ter}$	0 °C	0,029	Retangular	0,57	0,016
$V_{tlv}$	0,1 °C	0,029	Retangular	0,57	0,016
$D_{sis}$	0 mm	0,058	Retangular	1,00	0,058
$uc ( y ) = 0,462 \text{ mm}$					
$U = 0,93 \text{ mm}$					

Componentes da planilha de incerteza:

- $D_{rep}$  repetibilidade das medições;
- $C_{ced}$  certificado de calibração do comparador eletrônico de deslocamento;
- $C_{ter}$  certificado de calibração do termistor;
- $C_{tlv}$  certificado de calibração do termômetro de líquido em vidro;
- $R_{ced}$  resolução do comparador eletrônico de deslocamento;
- $R_{ter}$  resolução do termômetro digital;
- $V_{tlv}$  valor de uma divisão do termômetro de líquido em vidro;
- $D_{sis}$  desalinhamento do sistema.

Na Figura 4 está apresentada a relação entre a temperatura do fio e o deslocamento na amostra de NiTi de 150 µm nas medições no ar. Pode-se observar a curva característica de um material com memória de forma. Verifica-se neste gráfico que a histerese do sentido crescente em relação ao decrescente variou de 0,46°C até 9,09°C e o deslocamento variou de 0 mm a 50,53 mm, ou seja, -5,0% do comprimento total do fio testado. A incerteza de medição é de 1,86 mm para as leituras crescentes e de 0,63 mm para as decrescentes. A Tabela 3 representa a planilha de incerteza para o fio de 150 µm, sentido crescente.



**Figura 4.** Deslocamento x Temperatura do fio de 150  $\mu\text{m}$  no ar.

**Tabela 3.** Planilha de incerteza para o fio de 150  $\mu\text{m}$ , sentido crescente.

Grandeza	Estimativa	Incerteza Padrão	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$		$c_i$	$u_i(y)$
$D_{\text{rep}}$	49,7364	0,1973	Normal	1,000	0,197
$C_{\text{ced}}$	0,005 mm	0,003	Normal	1,000	0,003
$C_{\text{ter}}$	1 °C	0,400	Normal	2,26	0,903
$C_{\text{tlv}}$	0 °C	0,015	Normal	2,26	0,034
$R_{\text{ced}}$	0,005 mm	0,001	Retangular	1,000	0,001
$R_{\text{ter}}$	0 °C	0,029	Retangular	2,26	0,065
$V_{\text{tlv}}$	0,1 °C	0,029	Retangular	2,26	0,065
$D_{\text{sis}}$	0 mm	0,058	Retangular	1,000	0,058
$uc ( y ) = 0,929 \text{ mm}$					
$U = 1,86 \text{ mm}$					

Neste planilha apresentada pela Tabela 3 podemos observar que a maior fonte de incerteza foi a do certificado de calibração do termistor, com  $u_i(y) \cong 0,90 \text{ mm}$ , utilizado para medir a temperatura do fio, enquanto que a segunda fonte de incerteza foi a repetibilidade das medições, com  $u_i(y) \cong 0,20 \text{ mm}$ .

## 4 CONCLUSÕES

Todas as medições realizadas apresentaram um comportamento não-linear e a maior histerese da temperatura foi de 12,3°C para o fio de 100  $\mu\text{m}$  e 9,1°C para o de 150  $\mu\text{m}$ .

Todos os resultados apresentaram uma boa repetibilidade e reprodutibilidade nos deslocamentos do sentido crescente.

As incertezas de medição expandidas encontradas foram de 0,9 mm e 1,9 mm nas medições no ar nos fios com os diâmetros de 100  $\mu\text{m}$  e de 150  $\mu\text{m}$ , respectivamente. As incertezas de medição obtidas para o deslocamento dos fios foram adequadas para o comprimento do fio utilizado.

O sistema fabricado para realização das medições deve ser aprimorado, construindo-se um novo dispositivo na horizontal e acoplando uma bomba para circulação do óleo. Este aprimoramento tem como objetivo tentar reduzir a histerese da temperatura.

As deformações máximas encontradas foram de 3,58% para o fio de 100  $\mu\text{m}$  e de 5,03 % para o de 150  $\mu\text{m}$ , as quais estão de acordo com o estabelecido pelo fabricante do fio, que estabelece uma deformação máxima de 3% a 5%.

## REFERÊNCIAS

- 1 OTSUKA, K., WAYMAN, C.M. Shape memory materials. United Kingdom: Cambridge University Press, 1998. 284 p.
- 2 GRENINGER, A.B., MOORADIAN, V.G. Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloys. Trans. AIME 128: 337-368, 1938.
- 3 KURDJUMOV, G.V., KHANDROS, L.G. Dokl. Akad. Nauk. SSSR 66: 211-213, 1949.
- 4 CHANG, L.C., READ, T.A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals - The gold-cadmium beta phase. Trans. AIME 189: 47-52, 1951.
- 5 BUEHLER, W.J., WANG, F.E. A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. Ocean Eng. 1: 105-120, 1967.
- 6 CALLISTER, W.D.Jr. Materials Science and Engineering An Introduction. 4th ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 38-119, 1997.
- 7 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, portaria nº 029 de 10/03/1995.
- 8 SOUZA, M.M. Caracterização de um Material com Memória de Forma. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Brasil, 2005.
- 9 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, 3a ed. Brasileira (agosto de 2003).