



## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÕES DE TEMPERATURA EFETUADAS POR TERMOPARES CROMEL-ALUMEL

José Ricardo Ferreira Oliveira, jose.ricardo@ufu.br<sup>1</sup>  
Andersson Guimarães Oliveira, anderssonoliveira@gmail.com<sup>2</sup>  
Jéssica Barbosa do Nascimento, nascimentojessicabarbosa@gmail.com<sup>3</sup>  
Rômulo Pierre Batista dos Reis, romulopierre@ufersa.edu.br<sup>4</sup>  
Marcos de Araújo Silva Filho, marcos.araujosf@gmail.com<sup>5</sup>  
Yoge Jerônimo Ramos da Costa, yoge.jeronimo@ufcg.edu.br<sup>5</sup>  
Celso Rosendo Bezerra Filho, celso.rosendo@ufcg.edu.br<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia - MG.

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus I, Cidade Universitária, CEP 58051-900, João Pessoa - PB.

<sup>3</sup>Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade, Rodovia Jorge Amado, km 16, Salobrinho, CEP 45662-900, Ilhéus - BA.

<sup>4</sup>Universidade Federal do Semi-Árido, Departamento de Engenharia e Tecnologia, Av. Francisco Mota, 572, Costa e Silva, CEP 59625-900, Mossoró - RN.

<sup>5</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, CEP 58429-900, Campina Grande - PB.

**Resumo.** Os autores, por meio deste trabalho, apresentam um procedimento experimental que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados num processo de medição temperatura através de termopares tipo K e os valores correspondentes desta grandeza estabelecidos por padrões. Este procedimento de calibração foi realizado em duas amostras metálicas de diferentes materiais. Em cada amostra foram instalados 7 termopares tipo K, usualmente conhecidos como Cromel-Alumel, através do processo de soldagem por descarga capacitiva. As medições de temperatura foram realizadas em dois pontos de mudança de fase: fusão do gelo e ebulição da água, ambos apreciados na cidade de Campina Grande, Paraíba. Assim, para cada termopar instalado em cada amostra, foi possível obter uma função linear característica, a partir de dois pares ordenados, onde  $x$  = temperatura medida e  $y$  = temperatura real, avaliados em cada um dos referidos pontos de mudança de fase. Estas equações peculiares, amparadas em valores padrões, neste caso os pontos de mudança de fase, permitem comparar as medições efetuadas pelos termopares em valores reais de temperatura, mitigando, por conseguinte, os erros experimentais. A diferença entre a temperatura real e a temperatura medida, em todos os casos avaliados neste trabalho, encontra-se dentro da faixa recomendada na literatura, confirmando a eficácia e a qualidade do processo utilizado para instalação dos termopares nas amostras.

**Palavras chave:** Procedimento Experimental. Termopar tipo K. Calibração. Erros de Medição.

### 1. INTRODUÇÃO

A medição de temperatura desempenha um papel fundamental nas Ciências Térmicas. O conhecimento espacial e temporal do campo térmico de um domínio físico, sujeito a certas condições de contorno, é muito importante para solucionar problemas diretos e inversos de condução de calor. Um fator determinante na qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos em experimentos voltados para identificação de propriedades termofísicas (Ferreira Oliveira, *et al.*, 2018b) ou para avaliação de desempenho de dispositivos de controle térmico (Oliveira, *et al.*, 2017) é a incerteza das medições de temperatura efetuadas através dos respectivos dispositivos experimentais.

Há um grande número de sensores disponíveis para medição de temperatura, e a escolha de qual deles usar numa aplicação específica está relacionada a fatores como a qualidade e a rastreabilidade das medições, a faixa de medição de temperatura e o custo deste processo. Os termopares são os mais utilizados de todos os sensores de temperatura. Sua simplicidade e confiabilidade têm um apelo óbvio para muitas aplicações industriais (Nicholas e White, 2001).

De acordo com Guths e Paulo (1998), o princípio de funcionamento de um termopar está relacionado com dois materiais homogêneos distintos formando um circuito fechado. Quando as duas junções deste circuito forem mantidas a diferentes temperaturas, haverá uma difusão de elétrons através das interfaces. Utilizando um voltímetro para medir a diferença de potencial e mediante conhecimento do parâmetro  $\alpha_{ab}$ , definido como o poder termoelétrico ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) dos dois materiais que compõem o circuito, será possível determinar a diferença de temperatura entre as duas junções, tornando o termopar num transdutor de temperatura.

Segundo Balbinot e Brusamarello (2010), os termopares tipo K, usualmente denominados Cromel-Alumel, são bastante utilizados por possuírem uma maior resistência mecânica associada a um maior tempo de vida útil, além de apresentarem um comportamento linear em sua curva característica tensão *versus* temperatura, em comparação com outros tipos de termopares.

Conforme o INMETRO (2012), a calibração de um sistema de medição — como os termopares deste trabalho, por exemplo — é a operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas, e, numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação. Em outras palavras, a calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados no processo de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

Os autores, através do presente trabalho, objetivam executar um procedimento experimental de calibração de termopares Cromel-Alumel soldados em amostras metálicas, de modo que as temperaturas medidas por aqueles instrumentos sejam relacionados com valores reais, limitando, portanto, os erros de medição de temperatura.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Instalação dos termopares

As medições de temperatura foram realizadas em duas amostras com formato cilíndrico, ambas com 12,5 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, constituídas de materiais diferentes, respectivamente: amostra 1 em aço inox AISI 304; amostra 2 em aço inox AISI 316. Conforme Figura 1, foram soldados em cada amostra 7 termopares Cromel-Alumel. Cada termopar possui 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 1 m de comprimento. Os locais de fixação, descritos na Tab. 1, foram definidos a partir de estudos de coeficientes de sensibilidade, conforme Ferreira Oliveira, *et al.*, 2018a.

Figura 1. Identificação dos termopares

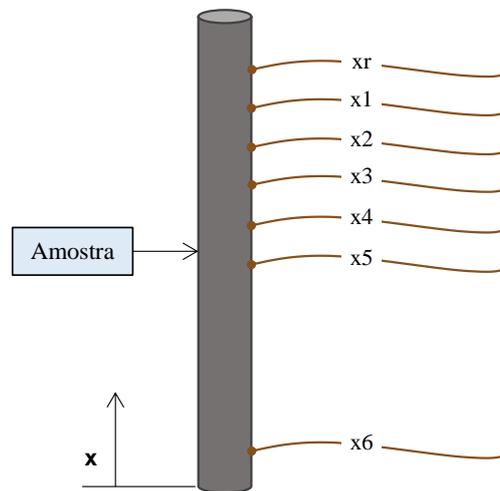
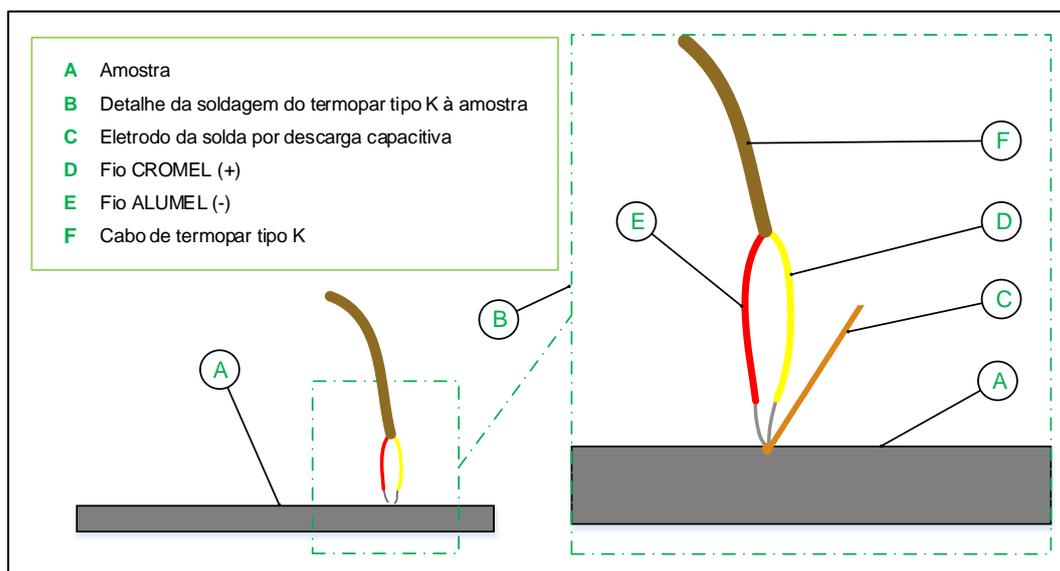


Tabela 1. Posicionamento (mm) dos termopares em relação a determinado referencial

Termopar	Amostra 1	Amostra 2
xr	130	130
x1	120	110
x2	115	105
x3	110	100
x4	105	95
x5	100	90
x6	5	5

A fixação dos termopares nas amostras se deu através do processo de soldagem por descarga capacitiva. Esta técnica tem a vantagem de assegurar um contato perfeito entre os termopares e os pontos onde se deseja medir as temperaturas e de reduzir o tempo de resposta que poderia provir de uma resistência térmica de contato entre os termopares e o corpo-de-prova (Bezerra Filho, *et al.*, 1999). A Figura 2 ilustra o processo de soldagem dos termopares.

Figura 2. Soldagem de Termopar



Um sistema de aquisição de dados foi utilizado para armazenar as temperaturas medidas nos experimentos. Este sistema é constituído por um aquisitor de dados 34970 da Agilent, o qual possui um componente interno que dispensa a utilização da chamada junção de referência ou junção fria no uso de termopares, e por um microcomputador, no qual há uma rotina em Visual Basic que realiza a aquisição dos dados e estabelece o número total de ciclos do experimento.

## 2.2. Procedimento experimental de calibração

O termopar Cromel-Alumel apresenta comportamento linear para uma ampla faixa de temperatura (-200 até 1250 °C). Isto permite, mediante processo de calibração, identificar uma expressão do tipo  $T_{REAL} = a + b \times T_{MEDIDA}$ , ou seja, uma função linear que relaciona a temperatura medida pelo termopar ( $T_{MEDIDA}$ ) a uma temperatura real ( $T_{REAL}$ ). A obtenção desta equação, para cada termopar em cada amostra, requer a determinação de dois pontos cartesianos. Da mesma maneira que em Noriega, *et al.*, 2015, as ordenadas destes pontos podem ser determinadas a partir das medições das temperaturas de fusão do gelo e de ebulição da água (é importante garantir que a água utilizada seja destilada).

Neste trabalho, as medições de temperatura foram efetuadas na cidade de Campina Grande-PB, Brasil. O valor analítico da temperatura de fusão do gelo, na referida cidade, é de aproximadamente 0,0 °C, valor este obtido a partir da equação de Clapeyron para o equilíbrio de fase sólido-líquido. Por sua vez, a temperatura de ebulição da água, por ser dependente da pressão atmosférica, foi determinada da seguinte maneira: por meio de um barômetro, aferiu-se a pressão atmosférica no instante da realização do procedimento de calibração; esta pressão foi inserida no *software* CATT (*Computer Aided Thermodynamic Tables*), onde se obteve a temperatura de vapor saturado da água em função de tais condições de pressão. Em todas as amostras em questão, essa temperatura foi de aproximadamente 98,0 °C.

As amostras devem ser posicionadas horizontalmente para evitar que possíveis efeitos de convecção natural interfiram nas medidas de temperatura efetuadas pelos termopares, tanto no ponto de fusão do gelo quanto no ponto de ebulição da água. As montagens experimentais para realizar medidas de temperatura no ponto de fusão do gelo e no ponto de ebulição da água encontram-se ilustradas nas Fig. 3 e Fig. 4, respectivamente.

Conforme Fig. 3, a amostra com os termopares soldados à ela foi imersa num recipiente preenchido com gelo de água destilada. Após certo tempo, haverá uma mistura a 0,0 °C de água e gelo em fusão. No momento em que o nível da água decorrente do derretimento do gelo ultrapassa a amostra, as temperaturas medidas através de cada termopar devem ser anotadas numa planilha. Conforme Fig. 4, a água resultante do processo de fusão do gelo será aquecida por meio de uma mesa térmica. Após o ponto de ebulição ser atingido, as temperaturas medidas através de cada termopar, indicadas no aquisitor de dados, também devem ser anotadas.

O procedimento experimental descrito permite a obtenção de dois pontos cartesianos para cada termopar: P1 ( $T_{MEDIDA}, T_{REAL}$ ) no ponto de fusão do gelo e P2 ( $T_{MEDIDA}, T_{REAL}$ ) no ponto de ebulição da água. Para um determinado termopar, o conhecimento destes dois pontos possibilita a construção de uma reta no plano cartesiano, cuja equação característica (uma função linear) permite converter valores de temperatura medidos em valores de temperatura reais.

Figura 3. Montagem experimental para medições de temperatura no ponto de fusão do gelo

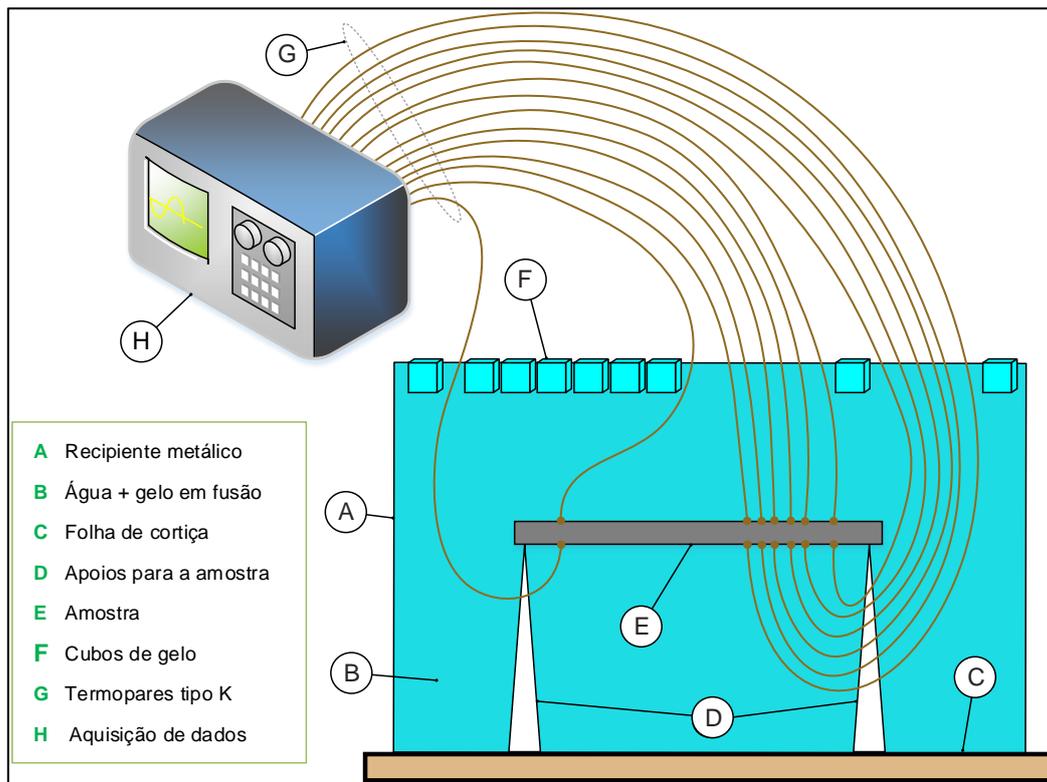
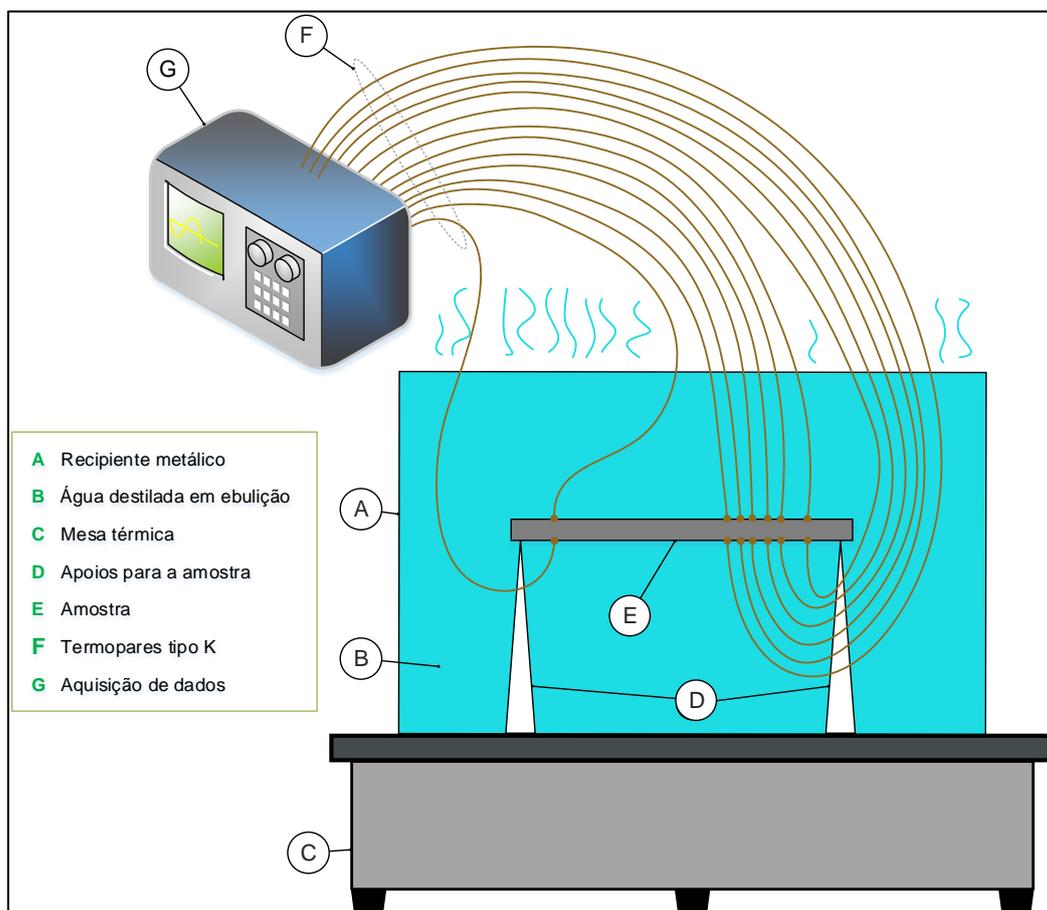


Figura 4. Montagem experimental para medições de temperatura no ponto de ebulição da água



### 3. RESULTADOS

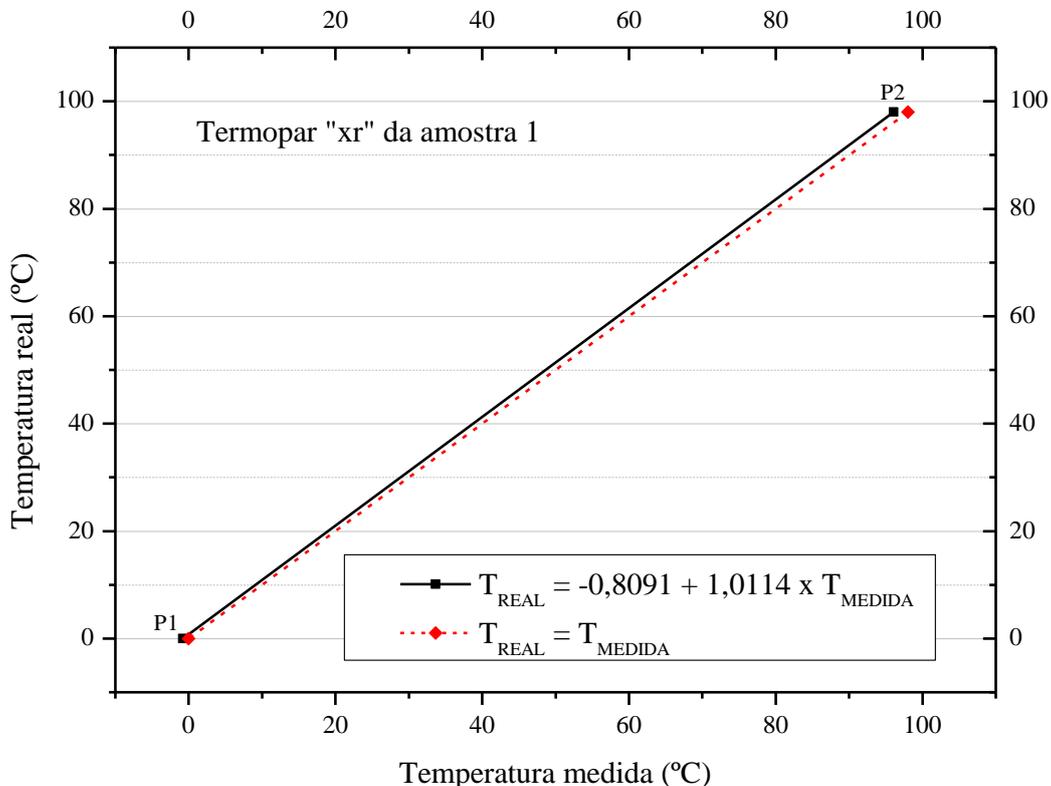
Com a execução dos procedimentos experimentais foi possível identificar, para cada termopar, a equação de correção da temperatura medida para temperatura real. A variável  $\epsilon$  foi definida como a diferença entre a temperatura real e a temperatura medida, em °C. O valor de  $\epsilon$  foi obtido nos pontos de fusão do gelo e ebulição da água. A Tabela 2 apresenta as equações de correção de medidas de temperatura, assim valores de  $\epsilon$  para determinados valores de  $T_{REAL}$ .

Tabela 2. Equações para correção de medições de temperatura efetuadas por termopares tipo K

Amostra	Termopar	Equação de correção	$\epsilon$ ( $T_{REAL} = 0,0$ °C)	$\epsilon$ ( $T_{REAL} = 98,0$ °C)
1	xr	$T_{REAL} = -0,8091 + 1,0114 \times T_{MEDIDA}$	0,8 °C	1,9 °C
1	x1, x2	$T_{REAL} = -0,9102 + 1,0114 \times T_{MEDIDA}$	0,9 °C	2,0 °C
1	x3, x4, x5	$T_{REAL} = -0,9093 + 1,0103 \times T_{MEDIDA}$	0,9 °C	1,9 °C
2	xr, x4	$T_{REAL} = -0,9121 + 1,0134 \times T_{MEDIDA}$	0,9 °C	2,2 °C
2	x1, x2, x3	$T_{REAL} = -0,9112 + 1,0124 \times T_{MEDIDA}$	0,9 °C	2,1 °C
2	x5	$T_{REAL} = -0,8099 + 1,0124 \times T_{MEDIDA}$	0,8 °C	2,0 °C

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2010), a tolerância para a diferença entre a temperatura real e a temperatura medida por um termopar tipo K é de  $\pm 2,2$  °C. Neste sentido, o procedimento experimental deste trabalho obteve êxito, pois todos os valores de  $\epsilon$  relacionados na Tab. 2 encontram-se dentro do limite de tolerância citado. Ainda segundo a Tab. 2, é plausível negligenciar a influência do tipo do material da amostra no valor de  $\epsilon$ . A Figura 5 permite visualizar graficamente a equação de correção da temperatura medida para temperatura real, para o caso do termopar “xr” instalado na amostra 1.

Figura 5. Temperatura real *versus* Temperatura medida



A Figura 5 fornece um comparativo da equação característica do termopar “xr” da amostra 1 com um caso ideal, no qual a temperatura medida é igual à real. Conforme a temperatura medida aumenta percebe-se um aumento gradativo de

e. Na verdade, uma análise da Tab. 2 mostra que isto se repete para todos os termopares, nas duas amostras. Tal detalhe deve-se ao fato do coeficiente angular da equação de correção não apresentar um valor unitário. Em todos os casos o valor deste parâmetro é maior que a unidade. Uma explicação para este comportamento é que a temperatura real do ponto de fusão do gelo é bastante precisa por ter sido determinada analiticamente, ao passo que o valor da temperatura real do ponto de ebulição da água apresenta uma maior incerteza, por ter sido determinado experimentalmente e com auxílio de um *software* de tabelas termodinâmicas.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um procedimento experimental, cuja finalidade era, através de um processo de calibração, determinar expressões matemáticas que relacionassem os valores de temperatura medidos de termopares tipo K com valores reais. Duas amostras foram utilizadas: uma de aço inox AISI 304 e a outra de aço inox AISI 316. Em cada uma delas foram instalados 7 termopares através do processo de soldagem descarga capacitiva, em locais determinados a partir de estudos de sensibilidade. Inicialmente as amostras foram inseridas num ambiente com gelo em processo de fusão e posteriormente noutro ambiente, desta vez com água em ebulição. Estes dois procedimentos ocorreram na cidade de Campina Grande-PB, Brasil. Por meio da formação de pares ordenados com as temperaturas medidas (abscissa) em cada um destes dois ambientes e os valores reais das temperaturas de mudança de fase (ordenada) em questão, foi possível a identificação de uma função linear característica para cada termopar. Estas funções permitiram a comparação da temperatura real com a temperatura medida por cada termopar. A diferença entre estas temperaturas encontra-se dentro da faixa indicada na literatura, comprovando a eficácia da soldagem dos termopares às amostras através do processo de descarga capacitiva.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq e à FINEP pelo apoio financeiro durante a realização deste trabalho. Os autores também agradecem à Fabiana Maria do Carmo Lima, pelo auxílio e apoio concedidos durante a realização dos experimentos.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Balbinot, A., Brusamarello, V. J., 2010. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro - RJ, Vol. 1, 2ª edição.
- Bezerra Filho, C. R., Lima e Silva, S. M. M., Laurent, M., Raynaud, M., 1999. “Determinação da difusividade térmica utilizando um sinal periódico”. In *Proceedings of 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering - COBEM 1999*. Águas de Lindóia - SP, Brasil.
- Ferreira Oliveira, J. R., Lucena, L. R. R., Reis, R. P. B., de Araújo, C. J., Bezerra Filho, C. R., 2018. “Development of an experimental device for thermal diffusivity identification of metallic alloys using a periodic temperature field”. In *Proceedings of 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2018*. Águas de Lindóia - SP, Brasil.
- Ferreira Oliveira, J. R., Lucena, L. R. R., Reis, R. P. B., de Araújo, C. J., Bezerra Filho, C. R., 2018. “Thermal diffusivity identification of nickel-titanium sma using a periodic temperature field”. In *Proceedings of 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2018*. Águas de Lindóia - SP, Brasil.
- Guths, S., Paulo, V., 1998. *Instrumentação em Ciências Térmicas*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, Brasil.
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, 2012. *Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais de Termos Associados (VIM 2012)*. Duque de Caxias - RJ, Brasil.
- Noriega, M., Ramírez, R., López, R., Vaca, M., Morales, J., Terres, H., Lizardi, A., Chávez, S., 2015. “Thermocouples calibration and analysis of the influence of the length of the sensor coating”. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 582 (1), p. 01-06.
- Nicholas, J. V., White, D. R., 2001. *Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2ª edição.
- Oliveira, A. G., Ferreira Oliveira, J. R., Reis, R. P. B., Silva, P. C. S., Silva, A. A., Bezerra Filho, C. R., 2017. “Numerical simulation and experimental procedures for heating and cooling of a SMA spring device”. In *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2017*. Curitiba - PR, Brasil.
- Omega Engineering, 2015, *Manual de Referência Técnica de Temperatura*.

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.