



CÁLCULO DE INCERTEZA E ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE PARA O APARATO COMERCIAL DE PLACA QUENTE PROTEGIDA

Carlos E. C. Galharo¹, Rodrigo S. Neves², Eveline De Robertis³, Carlos A. Achete⁴

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (Inmetro), Duque de Caxias-RJ, Brasil, cegalharo@inmetro.gov.br

² Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (Inmetro), Duque de Caxias-RJ, Brasil, rsneves@inmetro.gov.br

³ Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (Inmetro), Duque de Caxias-RJ, Brasil, erobertis@inmetro.gov.br

⁴ COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, achete@metalmat.ufrj.br

Resumo: O aparato de placa quente protegida (GHP, do nome na língua inglesa “guarded hot plate”) é um dos principais métodos para a medição de condutividade térmica em materiais isolantes. Por se tratar de método primário, amplamente utilizado para a produção de materiais de referência, o estudo de sua incerteza é tema de grande interesse metrológico. Entretanto, os estudos publicados sobre a incerteza do aparato de GHP supõem total conhecimento do projeto do equipamento [1-3]. Suposição que não é verdadeira quando tratamos de equipamentos adquiridos comercialmente. Neste trabalho é apresentada uma alternativa para estimar a incerteza de um equipamento comercial de GHP, assim como um breve estudo de reprodutibilidade do equipamento adquirido pelo Inmetro.

Palavras chave: condutividade térmica, metrologia de materiais, aparato de placa quente protegida, incerteza, reprodutibilidade.

1. Introdução

A medida de condutividade térmica faz parte de um importante problema de engenharia: a perda de calor. A perda não controlada de calor de um sistema para o ambiente tem importância central em diversas atividades econômicas, como a construção civil, a linha branca de eletrodomésticos e a indústria petrolífera. A preocupação do poder público com a eficiência energética nessas atividades ganhou força com crise de energia vivenciada em 2001. Foi criado o decreto nº 4059/01, que regulamenta a lei nº 10.295/01 que versa sobre eficiência energética de máquinas e construções. Nesse decreto são atribuídas ao Inmetro as responsabilidades de fiscalizar e avaliar a conformidade da eficiência energética de equipamentos e construções brasileiras assim como acreditar laboratórios para tal.

Para cumprir esse objetivo, no que diz respeito às medições de condutividade térmica, o Inmetro adquiriu um equipamento GHP modelo Unitherm 6000 da Anter Corporation. Por se tratar de um método primário esse equipamento pode ser utilizado para o desenvolvimento de MRCs, sendo assim fundamental para garantir a cadeia de rastreabilidade nos laboratórios acreditados. Dessa forma, vislumbrando o desenvolvimento de um MRC, realizamos um estudo detalhado da incerteza do equipamento e de sua reprodutibilidade [5].

2. Equipamento

Um GHP deve garantir as condições experimentais para que valha a lei de Fourier. Para isso cria-se um gradiente de temperatura entre duas placas, sendo que cada placa possui condições isotérmicas para garantir um fluxo de calor unidimensional e estacionário. Na prática a amostra a ser ensaiada é colocada em contato com uma placa plana que será aquecida por efeito Joule. Essa placa é cercada por uma proteção, para garantir que o fluxo de calor ocorrerá apenas na direção perpendicular a amostra. Entre a proteção e a placa é deixada uma pequena lacuna chamada gap. Um gradiente de temperatura é criado através da amostra, colocando sua outra face em contato com uma segunda placa, com uma temperatura inferior à da placa quente. Esta segunda placa é conhecida como placa fria. Nesse sistema o calor pode migrar pela parte superior e inferior da placa quente. Para contornar esse fato existem duas possíveis montagens de sistema. Na primeira são utilizadas duas amostras do mesmo material e o mesmo gradiente de temperatura é criado entre a placa quente e as placas frias, como mostra a figura 2.1. Essa montagem é conhecida como “Double-Sided Mode”. A segunda opção é utilizar uma amostra de condutividade térmica conhecida como isolante auxiliar e criar um gradiente de temperatura menor nessa amostra. Essa montagem é conhecida como “Single-Sided Mode”. Um esboço da montagem “Double-sided mode” é apresentado na figura 2.2.

O modelo Unitherm 6000 da Anter Corp é uma placa quente protegida que opera apenas em “Single-sided mode”. Nesse trabalho a placa fria em contato com o isolante auxiliar será chamada de buffer. A amostra a ser analisada é colocada entre as placas e pressionada pela placa fria para manter o contato térmico.

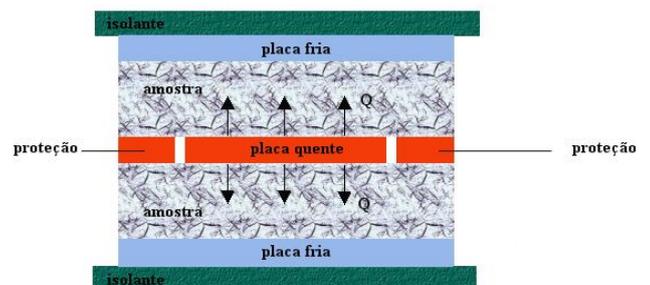


Figura 2.1. Montagem experimental do método da placa quente protegida em modo “Double-sided”.

Além da proteção tradicional do método o Unitherm 6000 conta com proteções externas, como pode ser observado na figura 2.2. Essas proteções minimizam a perda de calor pela borda da amostra.

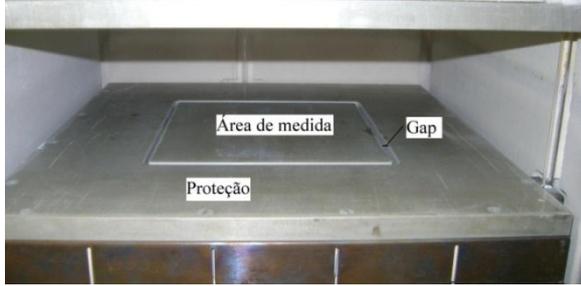


Figura 2.2: Foto da câmara interna do Unitherm 6000. Na foto é mostrada a placa quente, sua área de medição e sua proteção, assim como as proteções laterais e a placa fria (no topo).

3. Calculo de incerteza

Seja uma amostra de espessura L ensaiada no Unitherm 6000, suponha que a amostra seja submetida a um gradiente de temperatura (ΔT), entre a placa quente e a placa fria, e um fluxo de calor (Q) sai da placa quente em direção ao topo do aparato, através de uma área (A). Utilizando a lei de Fourier:

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta T}{L}, \quad (1)$$

sendo k a condutividade térmica da amostra.

Isolando k na equação (1) e aplicando a lei de propagação de incerteza [6] temos que a incerteza associada a essa medição pode ser expressa como:

$$u(k)^2 = \left(\frac{QL}{A^2 \cdot \Delta T}\right)^2 u(A)^2 + \left(\frac{Q}{A \cdot \Delta T}\right)^2 u(L)^2 + \left(\frac{L}{A \cdot \Delta T}\right)^2 u(Q)^2 + \left(\frac{QL}{L \Delta T^2}\right)^2 u(\Delta T)^2 \quad (2)$$

Na figura 3.1 é apresentado o diagrama de Ishikawa para facilitar a visualização dos fatores que influenciam cada componente da incerteza. A determinação de algumas componentes requer que o equipamento seja desmontado e suas partes sejam ensaiadas em separado, como por exemplo, os termômetros. Desmontar um equipamento comercial incorre em custos, riscos e perda de garantia e/ou violação de contrato de manutenção. Para contornar essa situação a incerteza foi estimada com base na informação fornecida pelo fabricante de cada parte do equipamento, utilizando os limites máximos de tolerância aceitos pelas normas internacionais que regem a produção daquela peça.

No que segue, cada componente da incerteza apresentado na figura 3.1 será discutido em detalhes.

3.1. Componentes da temperatura:

A medição de temperatura na placa quente é feita por termômetros de resistência de platina (PRTs). Esses termômetros funcionam com base na relação entre resistência elétrica e temperatura que determinados materiais apresentam. Essa relação, para a faixa de temperatura entre 0°C e 850°C , é dada pela equação de Callendar-Van Dusen [7]:

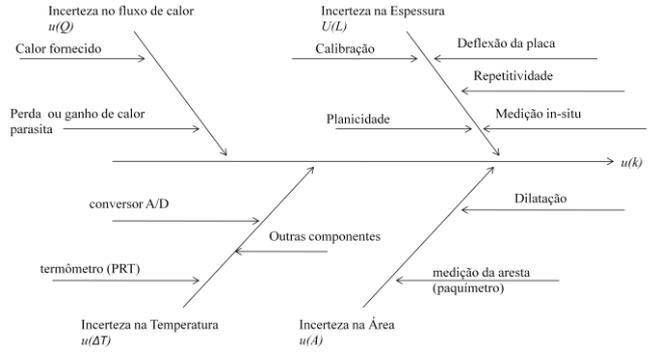


Figura 3.1: Diagrama de Ishikawa para a incerteza do aparato de placa quente protegida do Inmetro.

$$R(T) = R_0[1 + AT + BT^2]. \quad (3)$$

Os PRTs utilizados no Unitherm 6000 são do tipo pt100 de classe A. Segundo a norma IEC 60751 [8] os valores das constantes para esses PRTs são: $R_0 = 100 \Omega$, $A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$. Se uma corrente I , constante, for utilizada para excitar os PRTs, a lei de Ohm garante que:

$$V(T) = R_0 I [1 + AT + BT^2]. \quad (4)$$

Para capturar a voltagem, o Unitherm 6000 utiliza um conversor A/D de 23 bits, dos quais 20 são utilizados para armazenar o valor da medição numa amplitude de 13 V. A corrente utilizada para excitar os PRTs do equipamento é de 1 mA.

Assim, a medição de temperatura está sujeita às duas componentes principais de incertezas: incerteza no conversor A/D e a incerteza associada à medição de temperatura pelo PRT. Além dessas, outras contribuições de pequeno valor ocorrem: as múltiplas medições de temperatura no estado estacionário, o auto-aquecimento dos termômetros de platina, a diferença entre a temperatura medida pelos PRTs, a distribuição da temperatura na placa e a incerteza na corrente que excita os PRTs. Aplicando a lei de propagação das incertezas, temos:

$$u_T = \sqrt{u_{A/Dtemp}^2 + u_{prt}^2 + u_{outras}^2}. \quad (5)$$

Foi utilizado o sub-índice *temp* para ressaltar que essa é a componente de incerteza do conversor A/D em função da temperatura. Uma vez que o objetivo é calcular a incerteza do gradiente de temperatura entre as placas. Dessa forma, temos:

$$\Delta T = T_{quente} - T_{fria}, \quad (6)$$

Mas, $u_{T_{quente}} = u_{T_{fria}} = u_T$, daí: $u_{\Delta T} = u_T \sqrt{2}$. (7)

3.1.1. Conversor A/D ($u_{A/D}$):

Invertendo a equação (4):

$$T = \frac{-R_0 A + \sqrt{(R_0 A)^2 - 4R_0 B(R_0 - \frac{V}{I})}}{2BR_0} \quad (8)$$

Escrevendo a incerteza da medição de temperatura em função da incerteza na medição de voltagem:

$$u_{A/D_{temp}}^2 = \left(\frac{\partial T}{\partial V} u_{A/D_{volt}} \right)^2$$

$$u_{A/D_{temp}} = \frac{1}{R_0 I} \left[A^2 - 4B \left(1 - \frac{V}{R_0 I} \right) \right]^{\frac{1}{2}} u_{A/D_{volt}} \quad (9)$$

Com 20 bits para um intervalo de 13 V de amplitude a resolução do conversor é de $1,24 \times 10^{-5}$ V. Esse valor sera considerado como estimativa da incerteza.

3.1.2. Resistência (u_{prt}):

Uma vez que as curvas de calibração para os PRTs do aparato não estão disponíveis, a tolerância para PRT de classe A, discutida na norma IEC 60751 [8], será utilizada para a estimativa da incerteza. Essa tolerância é dada por:

$$Tol = \pm(0,15 + 0,002T). \quad (10)$$

Supondo uma distribuição triangular [6]:

$$u_{prt} = \frac{Tol}{\sqrt{6}} \quad (11).$$

3.1.3. Outras incertezas (u_{outras}):

A incerteza associada às múltiplas medições de temperatura no estado estacionário e a incerteza associada a corrente que excita os PRTs podem ser desprezadas [1]. O auto-aquecimento dos termômetros de platina possui incerteza de $0,0017$ °C [1,9,10] e a incerteza associada a diferença entre a temperatura medida pelos PRTs e a distribuição de temperatura na placa quente [11,12] é de $0,029$ °C. Combinando essas incertezas temos: $u_{outras} = 0,03$ °C (12)

3.1.4. Balanço de incerteza para a componente de temperatura:

O balanço de incerteza para a componente de temperatura da amostra para o MRC 1450c do Nist, a uma temperatura de $56,21$ °C (proporcional a medição de $0,12$ V pelo conversor A/D), é mostrado na figura 3.2. Os resultados apresentados mostram que a componente preponderante da incerteza global associada à medição da temperatura é a incerteza das medidas realizadas com os PRTs. A diminuição da contribuição dessa componente passa necessariamente pela calibração externa dos PRTs, procedimento que envolve a retirada e posterior reinstalação dos sensores. Todavia, essa abordagem, quando aplicada a equipamentos comerciais, incorre nos problemas citados anteriormente na seção 3.

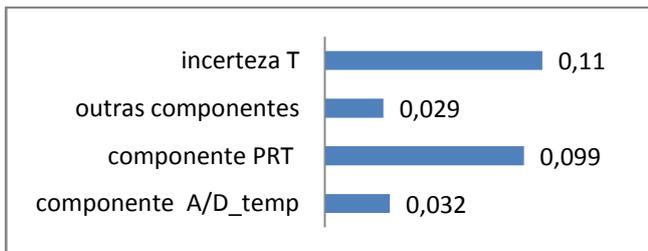


Figura 3.2. Balanço de incertezas para a componente de temperatura em °C.

3.2. Componente da área:

A área de medida, levando em consideração os efeitos de dilatação [10], pode ser escrita como:

$$A = (L_{interno}^2)(1 + \alpha \Delta T_d)^2 \quad (13)$$

Onde área $L_{interno}^2$ é a aresta da área de medição, α é o coeficiente de dilatação linear da placa quente e ΔT_d é a diferença de temperatura entre a temperatura na qual foram realizadas as medições das áreas e a temperatura de execução do ensaio.

Aplicando a lei da propagação de incertezas temos:

$$u_A = \sqrt{c_{L_{interno}}^2 u_L^2 + c_{\alpha}^2 u_{\alpha}^2 + c_{\Delta T_d}^2 u_{\Delta T_d}^2} \quad (14)$$

$$c_{L_{interno}}^2 = 2L_{interno}(1 + \alpha \Delta T_d)^2 \quad (15)$$

$$c_{\alpha}^2 = 2\Delta T_d(L_{interno}^2)(1 + \alpha \Delta T_d) \quad (16)$$

$$c_{\Delta T_d}^2 = 2\alpha(L_{interno}^2)(1 + \alpha \Delta T_d) \quad (17)$$

Cada componente da incerteza da área será analisada em detalhes.

3.2.1. Arestas (u_L):

Para a medição das arestas internas e externas foi utilizado um paquímetro calibrado. O paquímetro possui duas fontes de incerteza, o certificado de calibração e a reprodutibilidade da medição. Foi realizado um conjunto de sete medições das arestas interna e externa: $L_{interno} = 149,21$ mm e $L_{externo} = 155,49$ mm, respectivamente. A incerteza do certificado do paquímetro é de $0,03$ mm e a repetibilidade encontrada de $0,01$ mm.

3.2.2. Coeficiente de dilatação (u_{α}):

As placas que constituem o equipamento são feitas de liga de alumínio fundido 1100 (99% alumínio), dessa forma, será considerado que o coeficiente de dilatação linear da placa é o mesmo do alumínio puro, $\alpha = 2,36 \times 10^{-6}$ K. Para essa grandeza será considerada uma incerteza de 10%.

3.2.3. Temperatura ($u_{\Delta T_d}$):

A incerteza associada à temperatura é a mesma discutida na seção 3.1.

3.2.4. Balanço de incerteza para a componente da área:

O balanço de incerteza para a componente da área de uma amostra do MRC 1450c do Nist, a uma temperatura de $56,21$ °C, é mostrado na figura 3.3. Os resultados mostram que a incerteza na determinação da área de medida é afetada principalmente pela medição das arestas da região aproximadamente quadrada no centro da placa do equipamento (figura 2.2). Frente a essa componente, as demais contribuições à incerteza associada à determinação da área de medida são secundárias.

3.3. Componente da espessura:

A medição de espessura é realizada *in situ* por três transdutores de espessura. Essa medida é dada pela média entre esses três transdutores:

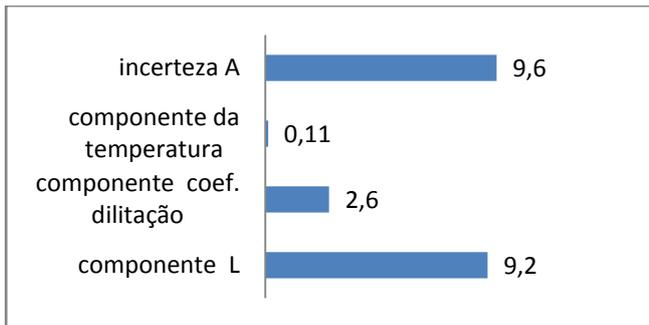


Figura 3.3. Balanço de incertezas para a componente da área da amostra em mm^2 .

$$L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (18)$$

Essa medição é influenciada pelos seguintes fatores: calibração dos transdutores de espessura, incerteza do sistema de medição *in-situ* que inclui a múltipla medição (três transdutores) e a incerteza do transdutor fornecida pelo próprio fabricante, a repetitividade da medição de espessura, o empenamento e a deflexão das placas.

A incerteza combinada da medição de espessura é:

$$u_L = \sqrt{u_{calib}^2 + u_{in-situ}^2 + u_{emp}^2 + u_{defl}^2 + u_{rep}^2}, \quad (19)$$

onde:

u_{calib}^2 = Calibração dos transdutores.

u_{in}^2 = Medição *in-situ*;

u_{rep}^2 = Repetitividade dos transdutores;

u_{emp}^2 = Empenamento da placa;

u_{defl}^2 = Deflexão da placa superior sob carga.

Sendo que todos os coeficientes de sensibilidade são iguais a unidade.

A seguir, cada componente dessa incerteza será analisado.

3.3.1. Instrumentos de medição:

Nessa etapa quatro equipamentos de medição estão envolvidos no procedimento. O paquímetro digital calibrado (resolução de 0,01 mm e incerteza de 0,03 mm) e os três transdutores de espessura (resolução de 0,001 mm e incerteza 0,3%).

3.3.2. Calibração (u_{calib}):

A norma ASTM C177 sugere que os transdutores sejam calibrados antes de cada ensaio. A calibração dos transdutores é realizada com a utilização do software do equipamento, em três passos. Primeiro marca-se o zero referencial, colocando as placas em contato. A segunda etapa consiste em utilizar um espaçador de espessura nominal de 76,20 mm. Com esses dois pontos o equipamento realiza a calibração do transdutor. Para validar a calibração um segundo espaçador com espessura nominal 38,10 mm é medido. Se a diferença entre o valor nominal e o valor do padrão for inferior a 0,020 mm os transdutores são considerados calibrados. Será considerado como distribuição uniforme. A calibração possui três componentes de incerteza, o limite considerado correto pelo processo de

calibração, o certificado de calibração do paquímetro utilizado para verificar os espaçadores e a repetitividade das medições de cada espaçador.

3.3.3. Medição *in-situ* (u_{in}):

A incerteza da medição *in-situ* possui duas componentes, a incerteza dos transdutores de espessura, fornecido pelo fabricante (0,03%) e a incerteza das múltiplas medições.

3.3.4. Repetitividade dos transdutores (u_{rep}):

Um conjunto de 7 medições foi realizado utilizando pequenos cilindros metálicos. Uma semana depois, outro conjunto de 7 medições foi realizado. Não foram encontrados desvios significativos entre os dois dias e a incerteza inferida a partir dos dados foi de 0,014 mm.

3.3.5. Empenamento da placa (u_{emp}):

O fabricante garante que o equipamento atende a norma ASTM C177 [9], onde a tolerância máxima para o empenamento da placa é de 0,025% da aresta externa. Assim, será considerado que o empenamento máximo, 0,03 mm, é a incerteza associada ao empenamento.

3.3.6. Deflexão da placa superior sob carga (u_{defl}):

Alguns materiais isolantes são compressíveis, como por exemplo, a lã de vidro. Para evitar que a força exercida pela placa superior deforme a amostra, um pequeno cilindro é colocado junto a cada transdutor a fim de garantir uma espessura mínima. Entretanto, a força realizada para manter o contato térmico deforma levemente a placa superior, pois a esta é exercida em seu centro e os pontos de apoio estão localizados na borda. Utilizando uma tabela de deflexão [13] sofrida em função da força e da geometria podemos calcular a deflexão máxima:

$$y_{max} = 0,1267 \frac{W L_{ext}^2}{E t^3}, \quad (20)$$

Onde y_{max} é a deformação máxima sofrida pela placa, W é a força exercida sobre a placa, E é o módulo de elasticidade do material e t a espessura da placa. Para o Unitherm 6000 os seguintes valores foram utilizados: $W = 444043 \text{ Pa}$, $t = 12,68 \text{ mm}$ e $E = 6,7 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$. A espessura e a área foram medidas com um paquímetro calibrado. Para o valor da pressão adotamos o máximo permitido pela norma ASTM C177 [9]. Substituindo os valores na equação (9) temos $y_{max} = 0,018 \text{ mm}$. Será assumido que a incerteza da medição causada pela deflexão da placa sob carga é y_{max} . Essa abordagem apresenta uma série de suposições que já foram discutidas na literatura [1].

3.3.7. Balanço de incerteza para a componente da espessura:

O balanço de incerteza para a componente da espessura da amostra do MRC 1450c do Nist, para a temperatura de 56,21 °C, é mostrado na figura 3.4. As leituras obtidas dos transdutores foram: 24,994 mm, 24,891 mm e 25,230 mm. Os resultados mostram claramente que a principal

componente da incerteza na medição da espessura da amostra é a incerteza da medida in situ, realizada pelos transdutores. A planicidade e a homogeneidade da própria amostra a ser ensaiada afeta diretamente essa componente da incerteza. Nesse caso, procedimentos para a minimização da incerteza devem ser analisados caso a caso, conforme as características particulares de diferentes amostras.

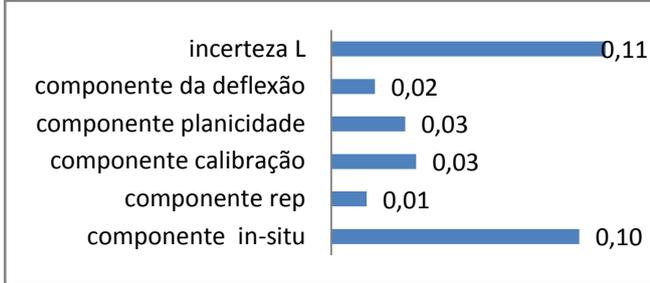


Figura 3.4. Balanço de incertezas para a componente da espessura da amostra em mm.

3.4. Componente do fluxo de calor:

O fluxo de calor a partir da placa quente é gerado via efeito Joule:

$$Q_f = V \cdot I \quad (21)$$

Como explicado na seção 2, devido à diferença de temperatura entre a placa quente e a placa buffer, uma parte do calor desce pelo isolante auxiliar (Q_f), que é informada pelo programa de controle. Além disso, segundo a norma ASTM C1043 [14], uma pequena parte do calor escapa pelo gap, Q_{gap} . Para a geometria de gap do Unitherm 6000 a quantidade de calor que escapa é dada por:

$$Q_{gap} = \frac{4L_{int}t k_{ar} \Delta T_{gap}}{L_{gap}}, \quad (22)$$

onde L_{int} é a aresta interna conforme informado na figura 2, t é a espessura da placa, k_{ar} é a condutividade térmica do ar, ΔT_{gap} é a diferença de temperatura no gap e L_{gap} a espessura do gap, $L_{gap} = (L_{externo} - L_{interno})/2$. Além disso, uma pequena correção deve ser feita no valor da condutividade térmica, devido a efeitos de transferência de calor nas guardas laterais. Para o Unitherm 6000 essa correção é de 0,0001 W/mK. Mais detalhes sobre essa correção podem ser encontrados em [15]. Dessa forma:

$$Q = Q_f - Q_{aux} - Q_{gap} \quad (23)$$

Aplicando a lei de propagação das incertezas:

$$u_Q = \sqrt{u_{Q_f}^2 + u_{Q_{aux}}^2 + u_{Q_{gap}}^2} \quad (24)$$

No que segue, cada elemento da equação (24) será analisado em detalhes.

3.4.1. Incerteza do calor fornecido (u_{Q_f}):

Utilizando a equação (21) podemos escrever a incerteza do fluxo de calor fornecido em função da incerteza da corrente e tensão:

$$u_{Q_f}^2 = I u_V^2 + V u_I^2 \quad (25)$$

Segundo as informações fornecidas pelo fabricante a incerteza da tensão aplicada é de 0,7 mV e a incerteza da voltagem é de 0,1 mV.

3.4.2. Incerteza do fluxo de calor pelo isolante auxiliar ($u_{Q_{aux}}$):

A única informação fornecida pelo fabricante é que o isolante auxiliar utilizado é o SRM 1449, fornecido pelo Nist, entretanto, parte do centro aquecedor das placas está localizado entre a placa quente e o isolante. A norma ASTM C1044 [16] sugere um processo iterativo para avaliar a condutividade térmica do isolante auxiliar, entretanto, o programa de controle não permite que a temperatura da buffer seja controlada a cada ensaio. Uma estimativa detalhada do fluxo de calor através do isolante auxiliar resultou numa incerteza aproximada de 9%.

3.4.3. Incerteza do calor que escapa pelo gap ($u_{Q_{gap}}$):

Aplicando a lei de propagação da incerteza na equação (22):

$$u_{Q_{gap}} = \left\{ \left[\left(\frac{Q_{gap}}{L_{int}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{gap}}{L_{gap}} \right)^2 \right] u_L^2 + \left(\frac{Q_{gap}}{t} \right)^2 u_t^2 + \left(\frac{Q_{gap}}{k_{ar}} u_{k_{ar}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{gap}}{\Delta T_{gap}} u_{\Delta T_{gap}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Onde u_L é a incerteza na medição da aresta interna, u_t é a incerteza na medição da espessura e $u_{\Delta T_{gap}}$ é a incerteza na medição de temperatura, discutida anteriormente. A incerteza para a condutividade térmica do ar ($u_{k_{ar}}$) foi estimada em 10%.

3.4.4. Balanço de incerteza para a componente do fluxo de calor:

O balanço de incerteza para a componente do fluxo de calor de uma amostra do MRC 1450c, a uma temperatura de 56,21 °C, é mostrado na figura 3.5. Na placa quente a tensão é de 0,297 V e a corrente 2,888 A. O calor que atravessa a amostra foi de 0,667 W. Os resultados mostram claramente que a principal fonte de incerteza é a medida do fluxo de calor através do isolante auxiliar. Como já comentado na seção 3.4.2, a configuração do equipamento e as características do programa de controle, não permitem a determinação da condutividade térmica do isolante auxiliar e a quantificação do fluxo de calor através do mesmo. Dessa forma, a abordagem para a estimativa da incerteza associada a esse processo foi extremamente conservadora.

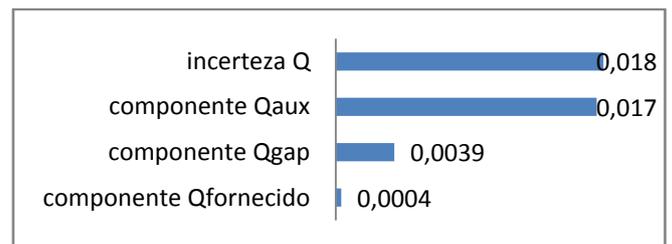


Figura 3.5. Balanço de incertezas para a componente do fluxo de calor em W.

3.5. Análise da incerteza combinada

O balanço de incerteza da condutividade térmica para uma amostra 1450c a temperatura de 56,21 °C é mostrado na figura 3.6 aonde foi medido um valor de $k=0,0373\pm 0,0010$ W/(m.K), uma incerteza de, aproximadamente, 3%. Os resultados mostram que o ponto central para a diminuição da incerteza no caso em questão é a obtenção de um controle maior sobre os parâmetros relacionados às medições de fluxo de calor. Neste aspecto, a principal componente é a incerteza associada ao fluxo de calor através do isolante auxiliar.

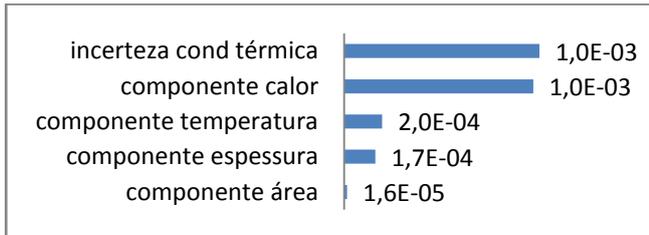


Figura 3.6. Balanço da incertezas combinada em W/(m.K)

4. Análise de reprodutibilidade

Foram realizados ensaios de condutividade térmica para duas amostras de silicato de cálcio (Skamol SUPER-1100) de mesma densidade, variando a temperatura de 40 °C até 400 °C.

Para a primeira amostra foi observado um ajuste linear de $k = 9 \times 10^{-5}T + 0,075$ com coeficiente de correlação de Pearson $R^2 = 0,984$, como mostra a figura 4.1. Nesse ensaio não ocorreu nenhum desvio significativo do comportamento linear da condutividade térmica.

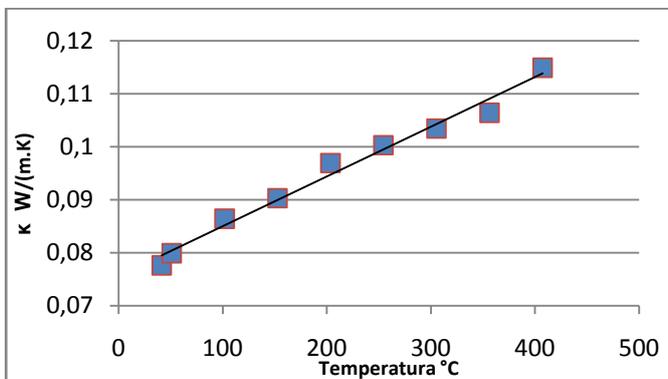


Figura 4.1. Medição da condutividade térmica pelo método de GHP (amostra 1).

Na figura 4.2 é apresentado os resultados para o ensaio de condutividade térmica para a segunda amostra. Junto aos valores experimentais é mostrado um ajuste linear de $k = 9 \times 10^{-5}T + 0,076$ com $R^2 = 0,989$. Comparando a figura 4.1 com a figura 4.2 conclui-se que o ajuste linear para as duas amostras estão em perfeito acordo, o que evidencia a reprodutibilidade do equipamento

5. Conclusão

A aplicação de uma estimativa de incertezas conservadora, devido à falta de acesso ao projeto detalhado do equipamento resultou em valores de incerteza aceitáveis

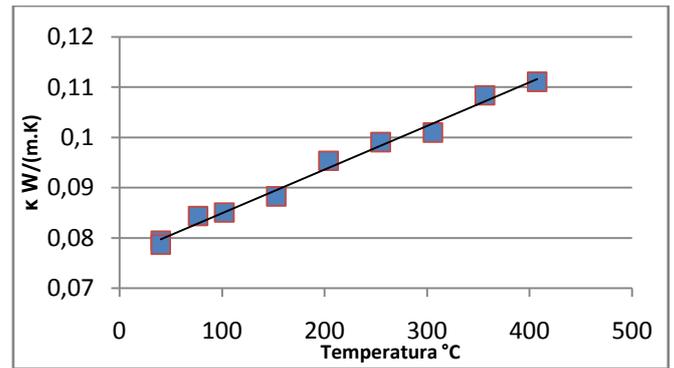


Figura 4.1. Medição da condutividade térmica pelo método de GHP (amostra 2).

para medição de k , em torno de 3% (60 °C). Os resultados das análises das amostras de silicato de cálcio indicam que não há tendências.

6. Referências

- [1] R. R. Zarr, Journal of Research of the National Institute of Standards and Tecnology 115 (2010) 23.
- [2] R. R. Zarr, Journal of Testing and Evaluation, 38 (2010) ID JTE1024621.
- [3] U. Hammerschmidt, International Journal of Thermophysics, 23 (2002), 1551.
- [4] T. Baba, Metrologia, 47 (2010) S143.
- [5] ISO/ICE Guide 34-4 *General requirements for the competence of reference material producers*. ISO, 2009.
- [6] ABNT/ISO *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. ABNT. 2003.
- [7] J. V. Nicholas, D. R. White *Traceable Temperatures - An Introduction to Temperature Measurement and Calibration* John Wiley & Sons, 1994.
- [8] IEC 60751:2008 *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*. IEC. 2008.
- [9] ASTM C177-10. *Standard Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate apparatus*. ASTM International. 2010.
- [10] ISO 8302:1991 *Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hotplate apparatus*. ISO. 1991.
- [11] Rennex, B. G, Journal of Building Physics, 7 (1993) 18.
- [12] M. H. Hahn, H. E. Robinson, and D. R. Flynn Robinson, ASTM STP, 544 (1974), 167
- [13] W. C. Young e R. G. Budynas . *Roark's Formulas for Stress and Strain*. Sétima edição. McGraw-Hill. 2002.
- [14] C1043 – 06 (Reapproved 2010) *Standard Practice for Guarded-Hot-Plate Design Using Circular Line-Heat Sources*. ASTM International. 2010.
- [15] K.-H. Bode., ASTM STP, 879 (1985) 29.
- [16] ASTM C1044 *Using a Guarded-Hot-Plate Apparatus or Thin-Heater Apparatus in the Single-Sided Mode*. ASTM International. 2007.