

DISPOSITIVO PARA DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO COM UM SINAL PERIÓDICO

Celso Rosendo Bezerra Filho

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Aprígio Veloso, 882 Campina Grande, PB, Brasil CEP 58109-970
Tel.: (83) 3101129 E-mail: Celso@dem.ufcg.edu.br

Zaqueu Ernesto da Silva

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica
Tel. (83) 2167268 E-mail: Zaqueu@les.ufpb.br

Martin Raynaud

Michel Laurent

Centre de Thermique de Lyon
20, Av. Albert Einstein Bât. 404, Villeurbanne, France CEP 69621
E-mail: timcethil@insa-lyon.fr

Resumo. Quando um fluxo de calor atravessa dois corpos que estão em contato, observa-se uma queda adicional de temperatura na interface que, em regime permanente, é caracterizada por uma grandeza denominada de resistência térmica de contato (RTC). A medida desta resistência tem recebido cada vez mais atenção em virtude de sua importância em áreas como a microeletrônica, processo de forjamento, projeto de válvulas de motores de automóveis, etc, onde o processo de transferência de calor é fortemente afetado pela mesma. Diversas técnicas para obtenção desta resistência tem sido utilizadas ao longo dos anos. Neste artigo, descreve-se um dispositivo construído no Centre de Thermique de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, para medir a RTC. A medição é realizada experimentalmente usando um sinal térmico de excitação periódica, cuja freqüência pode ser variada. A medição da RTC é feita de forma indireta através de relações matemáticas que expressam a mesma, tanto em função da amplitude como em função da defasagem do sinal com relação a um dado ponto referência. A vantagem da utilização deste método está no fato de se poder determinar numa única experiência, a condutividade térmica do material e a RTC. Os resultados obtidos com tal dispositivo mostram-se mais eficiente quando se é utilizado sinais de baixa freqüência térmica para determinação da RTC. Isto ocorre devido, principalmente, a dificuldade que se tem para medir sinais de freqüência térmica elevada, onde as amplitudes sendo muito baixas dificulta a obtenção de dados mais precisos. A difusividade térmica também pode ser obtida com esta técnica, utilizando-se para tanto uma amostra única, onde a RTC é nula.

Palavras-chave: Resistência de contato, Condutância de contato, Regime periódico

1. INTRODUÇÃO

A resistência de contato, R (Km^2/W), é definida através da relação:

$$R = \frac{\Delta T}{\phi} \quad (1)$$

onde ΔT e ϕ são respectivamente a diferença de temperatura na interface (K) e o fluxo de calor

(W/m²) que atravessa o contato. Fisicamente, esta propriedade representa a dificuldade encontrada pelo calor para atravessar as irregularidades apresentadas na região de contato entre os corpos. Esta resistência depende de uma série de parâmetros que estão associados à topografia das superfícies em contato e a propriedades termomecânicas dos materiais, bem como do fluido que preenche as irregularidades da interface. O conhecimento desta grandeza é importante para se modelar e prever de forma correta a dissipação de energia que pode ocorrer em problemas de transferência de calor que envolvem sistemas formados por dois ou mais corpos em contato. Com o objetivo de mostrar como esta grandeza pode ser medida, apresenta-se neste trabalho um dispositivo experimental para obtenção da RTC utilizando-se uma excitação térmica periódica. Este mesmo dispositivo pode ser utilizado também para obtenção da condutividade e difusividade térmicas.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Quando se utiliza uma excitação periódica, a RTC é obtida de forma indireta através de relações matemáticas que podem usar tanto a amplitude do sinal como a diferença de fase. São exatamente estas duas grandezas: a amplitude e diferença de fase que serão medidas quando o sinal estabilizar com o tempo a fim de se obter a RTC. Com este objetivo construímos um dispositivo experimental, cuja descrição e detalhes são apresentados à seguir. Uma visão geral do dispositivo é mostrada nas Figuras 1 e 2.

Para melhor explicar o funcionamento do dispositivo experimental, que foi construído no CETHIL (Centre de Thermique de Lyon), vamos dividi-lo em quatro partes, as quais são nomeadas de: sistema de aplicação da carga mecânica, sistema de aquecimento, sistema de produção de vácuo e sistema de aquisição de dados.

O sistema de aplicação da carga é constituído, como mostrado na Figura 1, por um cilindro pneumático (1), uma válvula direcional de cinco vias e duas posições (11), uma válvula reguladora de pressão (13), um manômetro (12) e uma fonte de ar comprimido. A válvula reguladora de pressão permite variar a pressão dentro do cilindro pneumático com uma precisão de 0,0035 bar. A transmissão da força as amostras é feita pressurizando-se a câmara superior onde se encontra o cilindro pneumático. O cilindro pneumático é então conectado a uma barra de aço inoxidável (22) que passa através de uma passagem, a prova de vazamentos, fixada na tampa de aço inoxidável (21). Esta barra de aço é guiada sobre as amostras através de dois rolamentos de esferas (3) montados em placas de aço de formato cilíndrico. A força aplicada as amostras é então medida por um captor de força (4) colocado sobre o isolante (5) situado sobre o aquecedor. O captor de força envia uma tensão ao sistema de aquisição de dados, proporcional à força aplicada. Neste sistema, a força sobre as amostras pode variar de 0 à 10 kN.

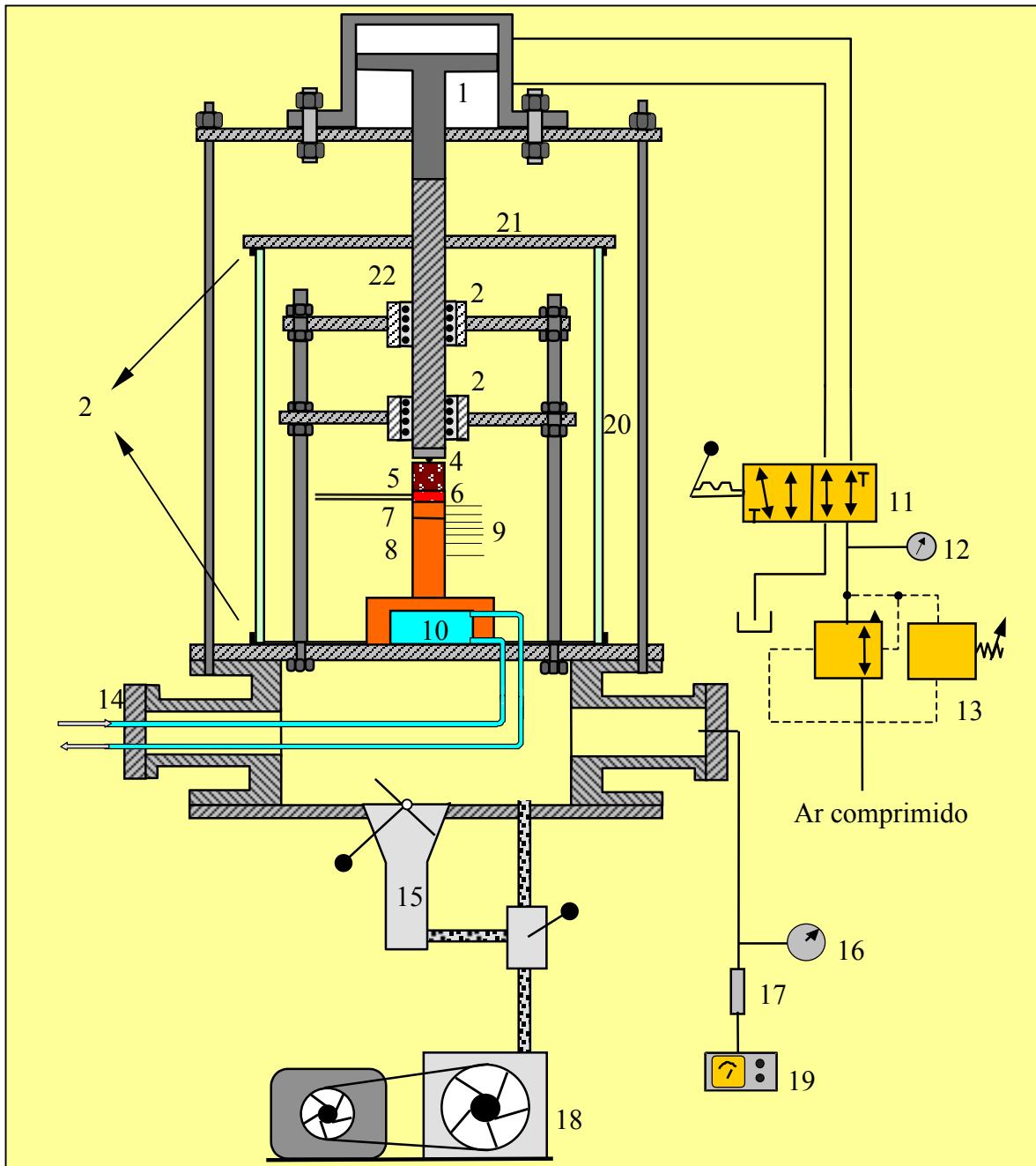
O sistema de aquecimento é constituído do aquecedor (6) e de uma fonte de alimentação estabilizada (11), ver Figura 2. O aquecedor é feito de um disco de níquel de 42 mm de diâmetro e 4 mm de espessura. Dentro deste disco de níquel foi feita uma cavidade de 3,2 mm de profundidade, onde foi colocada uma resistência elétrica de 2,70 Ohms feita com fio "thermocoax" e bobinada em dupla espiral, a fim de eliminar os efeitos de correntes parasitas provocadas pelo fenômeno de indução elétrica que causam erros de medição. A resistência foi soldada no interior da cavidade do disco e os espaços livres foram preenchidos com uma liga de cobre. O conjunto foi então usinado afim de ter uma superfície plana e garantir um bom contato entre o aquecedor e a amostra. Para evitar as perdas pela parte superior do aquecedor, uma camada de isolante (5) de 20 mm de altura e 10 mm de diâmetro, feito de Vespel ($\lambda=0,47$ W/mK), é colocado entre o aquecedor e o captor de força.

Para produzir uma potência periódica com freqüência variável, utilizamos uma fonte de alimentação estabilizada (22) controlada por computador (24) através de um programa feito em Viewdac. Desta forma, comanda-se uma tensão retificada para alimentação, a qual fornece a tensão, V (volts), para o aquecedor dada por:

$$V = V_m |\cos(\omega_e t)| \quad (2)$$

onde V_m é a amplitude de tensão (volts), ω_e é a freqüência elétrica (rad/s) e t é o tempo (s). Com esta tensão tem-se uma potência elétrica periódica, P_e (W), produzida no aquecedor dada por:

$$P_e = P_m [1 + \cos(\omega t)] \quad (3)$$



1: Cilindro pneumático

2: Anéis de borracha para vedação

3: Rolamentos de esfera para guiar a barra de aço

4: Captor de força

5: Isolante

6: Aquecedor

7 e 8: Amostras para ensaio

9: Termopares

10: Reservatório de água

11: Válvula direcional de cinco vias

12: Manômetro

13: Válvula reguladora de pressão

14: Tubulação da água de resfriamento

15: Bomba secundária de vácuo

16: Manômetro de vácuo

17: Pirani

18: Bomba de vácuo

19: Registrador da pressão do Pirani

20: Cilindro de vidro

21: Tampa de aço inoxidável

Figura 1. Dispositivo experimental: detalhe da câmara de testes e alguns periféricos.

onde P_m é a potência média (W) e ω é a freqüência térmica (rad/s), que é o dobro da freqüência elétrica. A potência fornecida pelo aquecedor cobre uma gama de 10 à 500 W para uma tensão entre 5 e 37 V.

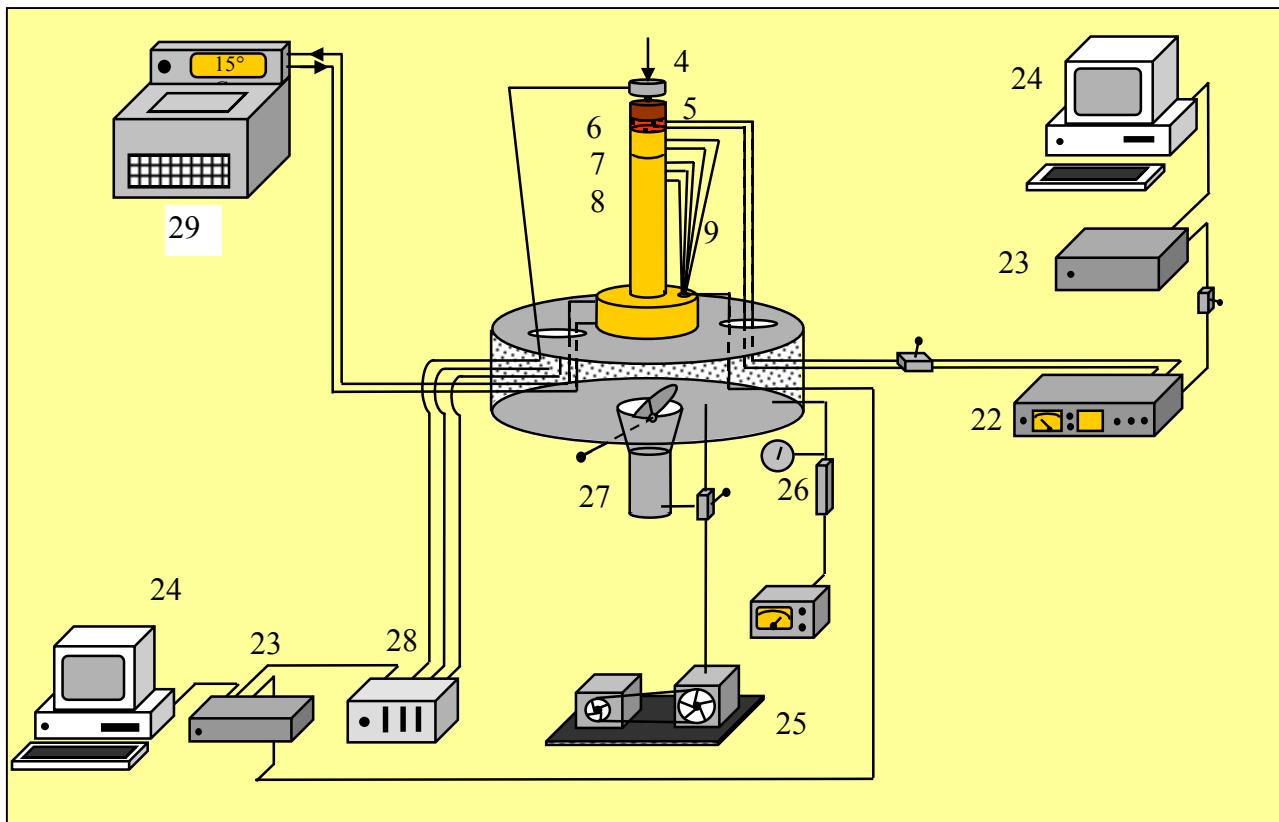


Figura 2. Dispositivo experimental: detalhe dos periféricos.

O sistema de refrigeração é constituído de um pequeno reservatório de água feito em cobre (10), ver Figura 1, e um banho regulador de temperatura (29), ver Figura 2. O banho regulador mantém a temperatura do fluido que circula no sistema de refrigeração (água) constante, com uma variação de mais ou menos 0,1 °C. Este fluido absorve o calor que atravessa a amostra em teste. Sendo o cobre um excelente condutor de calor, nós vamos supor que a temperatura da extremidade da amostra inferior é constante e igual à temperatura do fluido de refrigeração. A fim de garantir esta hipótese, foi colocada uma graxa condutora à base de alumínio entre o cilindro inferior e o reservatório de água com o objetivo de reduzir ao mínimo possível a resistência de contato entre os mesmos.

O sistema de vácuo é constituído de uma bomba primária de palhetas (25) e de uma bomba secundária de difusão de óleo (27) que produzem vácuo dentro de uma câmara cilíndrica de vidro (20), ver Figura 1, onde é colocada a amostra para o ensaio. Este vácuo, da ordem de 2 Pa, é medido com um manômetro de vácuo tipo Pirani (26), ver Figura 2. Para atingir este nível de vácuo é colocado um anel de borracha (2) nas extremidades da câmara de vidro que fica em contato com a tampa de aço inoxidável e a base do dispositivo, ver Figura 1. Sobre a parte inferior e superior do anel de borracha é colocada graxa de silicone para melhor a vedação.

O sistema de aquisição é constituído de duas unidades Keithley K500/575 (23). Uma das unidades é utilizada para geração da potência periódica enquanto a outra é utilizada para aquisição das tensões registradas pelos termopares (9), ver Figura 2. A resolução máxima teórica da carta de aquisição de temperaturas é de $1,5 \mu\text{V}$ ($0,04^\circ\text{C}$) para termopares do tipo K, que foram os utilizados nos ensaios. Para evitar perturbações devido a campos elétricos e magnéticos, a câmara de vidro é cercada por uma gaiola metálica chamada de caixa de Faraday e os termopares colocados dentro de uma malha de aço que serve como blindagem a campos eletromagnéticos.

3. AMOSTRAS ENSAIADAS

Para exemplificar a utilização do dispositivo experimental descrito acima, é apresentado um teste realizado em uma amostra constituída de dois cilindros de cobre comercial com 42 mm de diâmetro e 10 e 90 mm de altura respectivamente (ver Figura 3). As superfícies de contato das amostras foram preparadas no torno. A rugosidade equivalente da superfície de contato é de 1,309 μm .

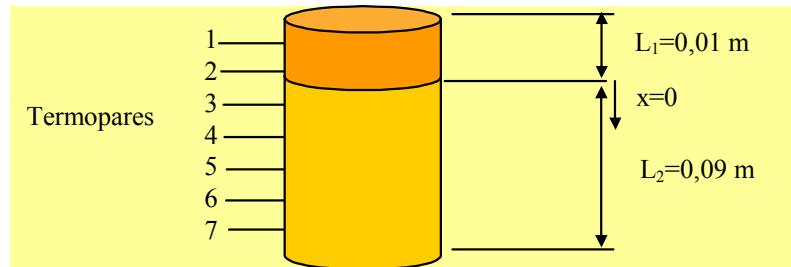


Figura 3. Amostra utilizada no ensaio.

Como o cobre é um ótimo condutor de calor pode-se trabalhar com freqüências elevadas, pois, o amortecimento das variações de temperatura ao longo das amostras é pequeno e consequentemente se tem um sinal mensurável nas diversas posições onde os termopares são instalados, a saber: -3,85 mm, -1,96 mm, 3,71 mm, 7,11 mm, 9,72 mm, 13,72 mm e 18,09 mm e denominados respectivamente por 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

As evoluções de temperatura nas amostras são registradas por sete termopares tipo K (cromel-alumel) de 80 μm de diâmetro que são soldados sobre as mesmas por descarga capacitiva: dois no cilindro superior e cinco no inferior. Cada um dos fios do termopar é soldado de maneira independente sobre o cilindro. Como as duas junções estão à mesma temperatura, o material intermediário não modifica a temperatura medida.

Um exemplo dos sinais emitidos pelos termopares após estabilização é mostrado na Figura 4 abaixo.

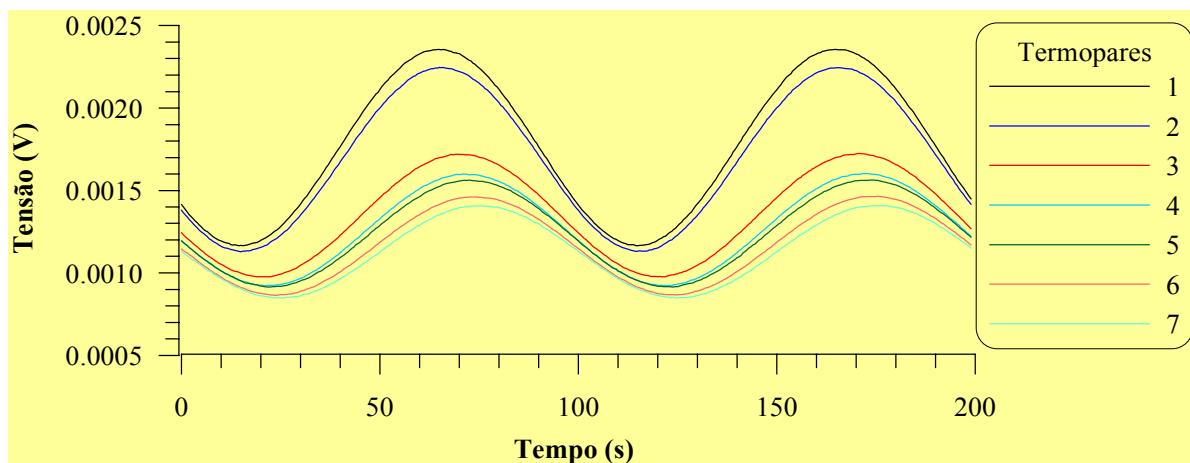


Figura 4. Tensões periódicas medidas pelos termopares.

Para faixa de temperatura utilizada nos ensaios (inferior a 60°C para evitar danos ao captor de força), a relação entre a mesma em °C e a tensão em μV do termopar tipo K é linear. Desta forma pode-se utilizar no modelo as tensões em μV no lugar das temperaturas em °C, já que adotaremos um ponto de referência que servirá para o cálculo da razão de amplitudes e da diferença de fase do sinal (defasagem). Com o dispositivo experimental descrito acima as amplitudes e as defasagens necessárias ao modelo são obtidas.

4. MODELO

A fim de mostrar a determinação da RTC utilizando um sinal periódico com diferentes freqüências e verificar o efeito da pressão mecânica de contato sobre a mesma, foram realizados testes na amostra descrita acima para dois valores diferentes da pressão mecânica de contato. A determinação desta RTC é realizada de forma indireta a partir de um modelo matemático que utiliza ora as amplitudes, ora as defasagens da razão de temperatura em um ponto qualquer (no cilindro inferior) e um ponto de referência (no cilindro superior). Os testes são realizados no vácuo, o que significa que o coeficiente de transferência de calor por convecção é próximo de zero. Desta forma, o número de Biot nas condições experimentais é muito inferior a 0,1, e pode-se supor que a temperatura em cada seção transversal da amostra é uniforme e o processo de condução de calor unidimensional.

Considerando as propriedades térmicas constantes, tem-se que a equação que rege o fenômeno de condução é:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad i = 1, 2, -L_1 \leq x \leq L_2, t > 0 \quad (4)$$

onde T_i é a temperatura (K) no cilindro i ; x é a coordenada espacial (m), a é a difusividade térmica ($110 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para o cobre utilizado) e t é o tempo (s).

A condição inicial e as condições de contorno são dadas por:

$$T_i(x, 0) = T_\infty \quad -L_1 \leq x \leq L_2 \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T_1(-L_1, t)}{\partial x} = \phi_0 + \phi_0 \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$T_1(0, t) - T_2(0, t) = -R\lambda \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(0, t)}{\partial x} \quad (8)$$

$$T_2(L_2, t) = T_\infty \quad (9)$$

onde T_∞ é a temperatura da fonte fria (K), λ é a condutividade térmica (375 W/mK para o cobre), ϕ_0 é o fluxo de calor (W/m^2), $\omega = 2\pi f$ (f é a freqüência do sinal do térmico em Hz) e R é a resistência térmica de contato (Km^2/W).

O campo de temperatura solução deste modelo é a soma de três campos térmicos: um permanente (T_p), um transitório (T_t) e um senoidal (T_s) (sem a componente contínua). Quando o tempo aumenta, a perturbação transitória ligada a condição inicial tende a zero (Carslaw & Jaeger, 1959) e o campo de temperatura é a soma de dois campos térmicos: um permanente e outro senoidal. A soma destes dois campos constitui o regime periódico estabelecido, que é o que nos interessa para determinar a RTC. A solução deste problema é apresentada em Filho (1998).

Chamando de x_r a posição do ponto adotado como referência (no cilindro superior) e de x uma posição qualquer (no cilindro inferior), obtém-se a seguinte relação para a temperatura senoidal nesses pontos:

$$\frac{T_{s2}(x, t)}{T_{sr}(x_r, t)} = \frac{-\{2\sinh[M(x - L_2)]\}}{\{2MR\lambda \cosh(ML_2) \cdot \cosh(Mx_r) - 2\sinh[M(x_r - L_2)]\}} \quad (10)$$

onde

$$M = m(1 + j) \quad \text{com} \quad m = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad \text{e} \quad j = \sqrt{-1} \quad (11)$$

A razão de temperaturas, Eq. (10), tem uma amplitude, A (adimensional), e uma defasagem, Ψ (graus) (em relação ao ponto de referência x_r) dada por:

$$A(x, x_r) = \left[\frac{(f_{2R}(x))^2 + (f_{2I}(x))^2}{(f_R(x_r))^2 + (f_I(x_r))^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\Psi(x, x_r) = \arctg \left[\frac{f_I(x_r)}{f_R(x_r)} \right] - \arctg \left[\frac{f_{2I}(x)}{f_{2R}(x)} \right] \quad (13)$$

onde

$$\begin{aligned} f_R(x_r) = 2mR\lambda &\{ \cos[m(L_2 + x_r)] \cosh[m(L_2 + x_r)] - \sin[m(L_2 + x_r)] \\ &\sinh[m(L_2 + x_r)] + \cos[m(L_2 - x_r)] \cosh[m(L_2 - x_r)] - \sin[m(L_2 - x_r)] \\ &\sinh[m(L_2 - x_r)] \} - 4 \cos[m(x_r - L_2)] \sinh[m(x_r - L_2)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_I(x_r) = 2mR\lambda &\{ \sin[m(L_2 + x_r)] \sinh[m(L_2 + x_r)] + \cos[m(L_2 + x_r)] \\ &\cosh[m(L_2 + x_r)] + \sin[m(L_2 - x_r)] \sinh[m(L_2 - x_r)] + \\ &\cos[m(L_2 - x_r)] \cosh[m(L_2 - x_r)] \} - 4 \sin[m(x_r - L_2)] \cosh[m(x_r - L_2)] \end{aligned} \quad (14)$$

$$f_R(x) = -4 \cos[m(x - L_2)] \sinh[m(x - L_2)] \quad (15)$$

$$f_I(x) = -4 \sin[m(x - L_2)] \cosh[m(x - L_2)] \quad (16)$$

A partir da expressão da amplitude, eq. (12), obtém-se uma equação do segundo grau em função da RTC ($CR^2 + DR + E = 0$), enquanto a expressão da defasagem, eq. (13), fornece uma equação do primeiro grau ($FR + G = 0$) para RTC.

A RTC é determinada utilizando-se uma média aritmética das resistências obtidas para cada um dos cinco termopares instalados no cilindro inferior.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

À partir das medidas das variações periódicas de temperaturas realizadas pelos termopares, vamos identificar o valor médio, a amplitude e a fase minimizando a função:

$$S(VM, A_T, \Psi_T) = \sum_{i=1}^{4000} (T_{exp} - T_{mod})^2 \quad (25)$$

onde VM , A_T , Ψ_T são respectivamente o valor médio, a amplitude e a defasagem de temperatura e, T_{exp} e T_{mod} ($T_{mod} = VM + A_T \cos(\omega t - \Psi_T)$) são respectivamente as temperaturas fornecidas pelos dados experimentais e pelo modelo. A identificação é realizada utilizando-se 20 períodos com 200 pontos de medida cada (4000 pontos no total) e utilizando-se um programa desenvolvido por Press e al. (1992), que usa o método de Levenberg-Marquard.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram feitos num vácuo de 2 Pa, onde primeiro se utilizou uma pressão mecânica de contato 2,12 MPa e em seguida uma pressão mecânica de 5,80 MPa. Em cada ensaio foi usada uma freqüência de excitação térmica diferente. Os resultados das amplitudes e defasagens são mostrados nas Figuras 5 e 6 para os ensaios realizados.

Pode-se constatar, para uma dada pressão mecânica, que à medida que a freqüência aumenta a razão de amplitudes diminui, enquanto que a defasagem aumenta. Nas mesmas Figuras 5 e 6, pode-se verificar que quanto maior for a carga mecânica, para uma dada freqüência, maior será a razão de amplitudes e menor será a defasagem. Isto é esperado fisicamente, pois a resistência de contato diminui quando aumentamos a pressão mecânica.

Os valores das resistências para as leituras dos termopares 3, 4, 5, 6 e 7, adotando o termopar 1 como referência, são determinados através das expressões de R a partir das amplitudes, eq. (12), e da defasagem, eq. (13) e suas médias aritméticas são mostradas nas Figuras 7 e 8. Pode-se contarar nestas figuras que quando a pressão mecânica aumenta, a resistência de contato diminui. Este fenômeno é atribuído a um aumento da área real de contato.

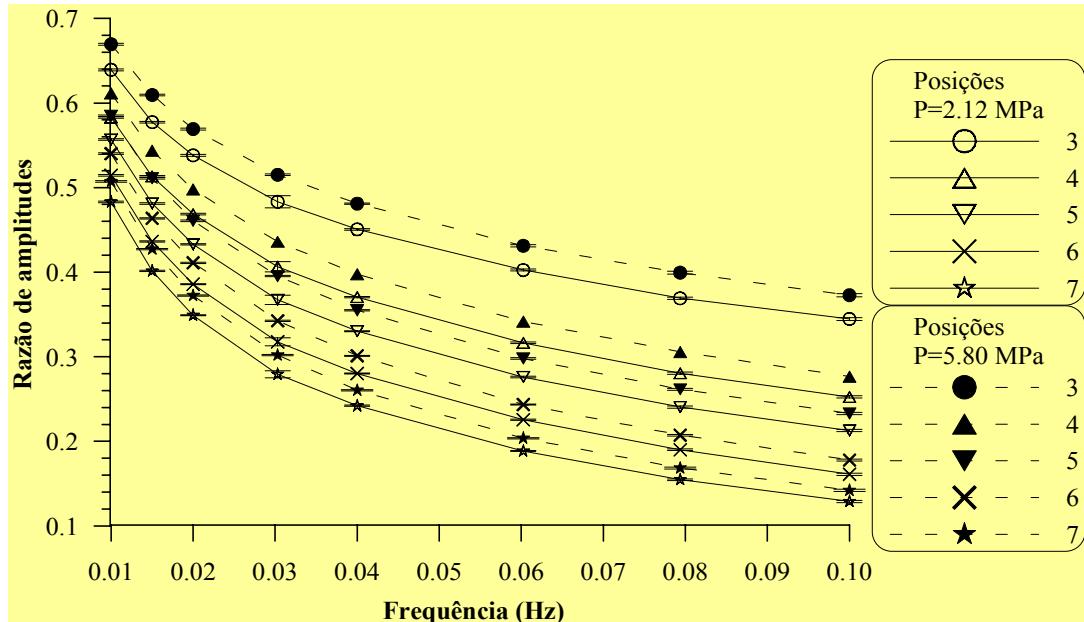


Figura 5. Razão de amplitudes de temperatura (referência: termopar 1).

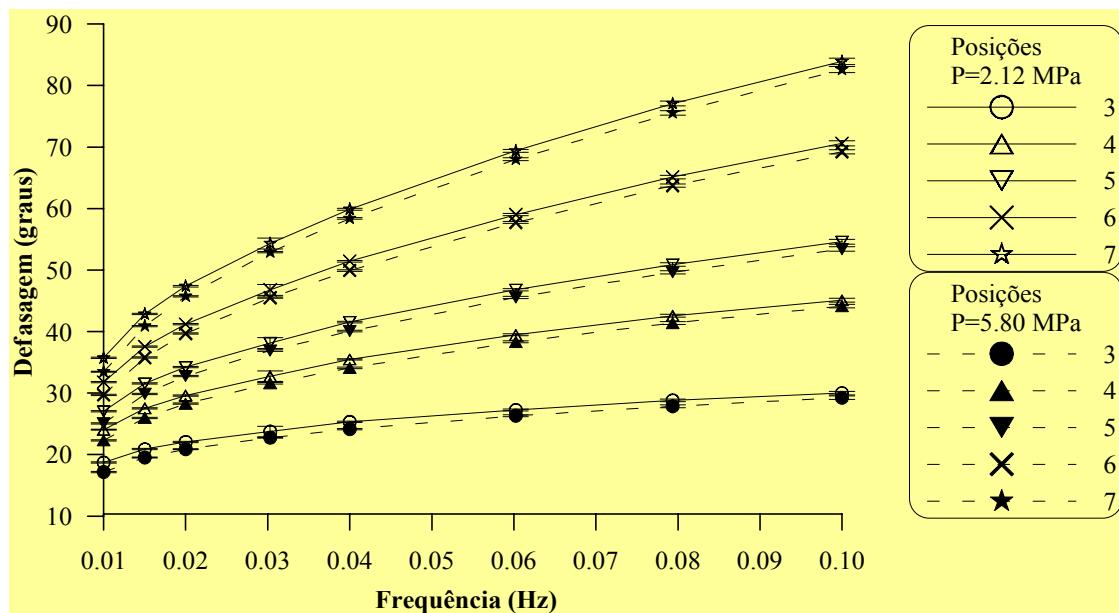


Figure 6. Defasagem de temperatura (referência: termopar 1).

As Figuras 7 e 8 mostra também que a RTC varia para uma dada pressão mecânica em função da freqüência. Estas variações, que são mais importantes em freqüências mais baixas podem ter suas causas em efeitos bidimensionais de transferência de calor, em erros nas propriedades térmicas utilizadas ou ainda nos microdeslocamentos provocados pelo sinal periódico que modificariam os picos de rugosidade em contato real, melhorando o contato e diminuindo a RTC.

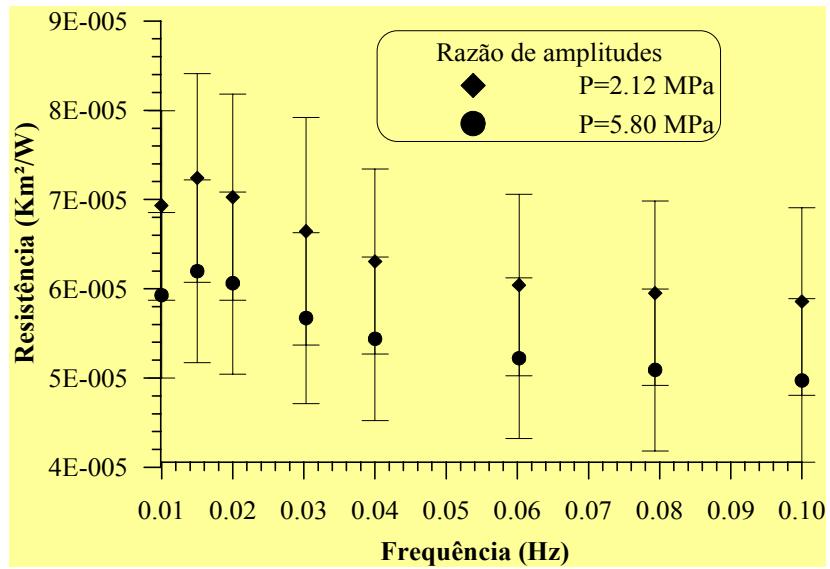


Figura 7. Resistências determinadas a partir da razão de amplitudes.

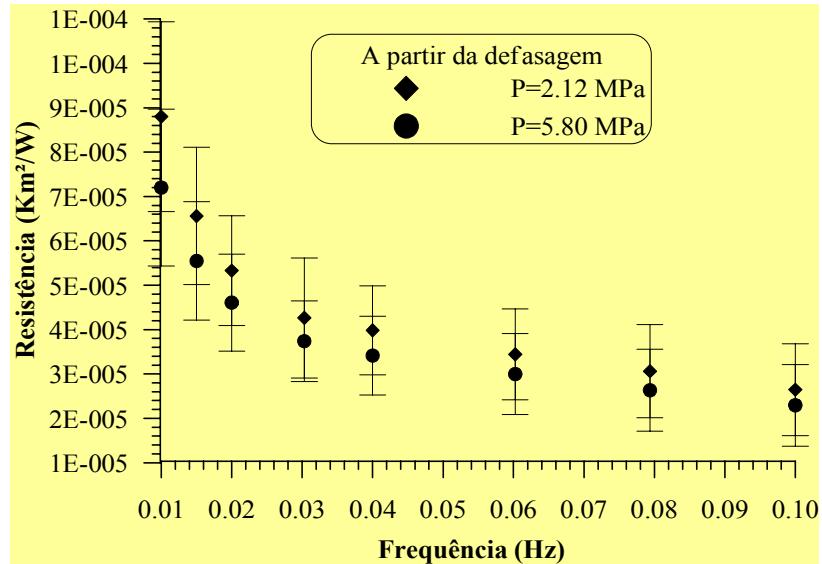


Figura 8. Resistências determinadas a partir das defasagens do sinal.

7. CONCLUSÃO

A técnica de medida da RTC utilizando um sinal periódico é muito simples e fornece uma boa idéia de sua ordem de grandeza. A utilização da mesma técnica permite obter algumas propriedades térmicas como a difusividade (usando a componente senoidal do sinal) e a condutividade térmica (usando a componente contínua). Entretanto, a medida que trabalha-se com materiais menos condutores, precisa-se utilizar freqüências mais baixas, que tem o inconveniente na demora de obtenção dos resultados, pois para que o regime se torne estabelecido, precisa-se de um tempo longo.

Agradecimentos

Meus agradecimentos vão para o CNPq e o Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da UFCG pelo apoio na realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

Carslaw, W. S. and Jaeger, J. C. Conduction of Heat in Solids. 2nd Edition. Oxford: Clarendon Press, 1959. 509 p.

Filho, C. R. B. Etude des resistances thermiques de contact en régimes périodique. Thèse de Doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1998, 214 p.

Press, H. N., Teukolsky, S.A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P. Numerical Recipes in Fortran. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, 934 p.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL APPARATUS TO DETERMINATE THE THERMAL CONTACT RESISTANCE WITH A PERIODIC SIGN

Celso Rosendo Bezerra Filho

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica
Tel.: (83) 3101129 Email: Celso@dem.ufpb.br

Zaqueu Ernesto da Silva

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica
Tel. (83) 2167268 Email: Zaqueu@les.ufpb.br

Martin Raynaud

Michel Laurent

Centre de Thermique de Lyon
20, Av. Albert Einstein Bât. 404, Villeurbanne, France CEP 69621
Email: timcethil@insa-lyon.fr

Abstract. When a heat flow crosses two bodies that are in contact, we observe an additional fall of temperature in the interface that, in permanent regimen, is characterized by thermal contact resistance (RTC). The measure of this resistance has received more attention because from its importance in areas as microelectronics, forging process, project of valves for automobiles engines, etc, where the process of heat transfer is affected by the RTC. Many techniques to measure this resistance have been used. In this article, an experimental apparatus to measure the RTC, constructed in Centre de Thermique de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, is described. The measurement is realized experimentally using a thermal signal of periodic excitement, whose frequency can be varied. The measurement of the RTC is made of indirect form through mathematical relations that express the same one, as much in function of the amplitude as in function of the phase of the signal with regard to data point reference. The advantage of the use of this method is in the fact that we can to determine in an only experience, the thermal conductivity of the material and the RTC. The results are more efficient when we use signals of low thermal frequency for determination of the RTC. This occurs due, mainly, the difficulty that we have to measure signals of high thermal frequency, where the amplitude being very low, makes it difficult to be measure. The thermal diffusivity also can be gotten with this technique, if we use an only sample, where the RTC is null.

Keywords: Contact Resistance, Contact Conductance, Periodic Regime.