

INFLUÊNCIA DE ALGUNS PARÂMETROS SOBRE A RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO

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.ufpb.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. Sistemas formados pela união de dois ou mais corpos são comuns em diversas aplicações de engenharia. Muitos destes sistemas precisam dissipar ou manter a energia em seu interior. Quando um fluxo de calor passa através de tais sistemas observa-se uma queda adicional de temperatura na interface de contato que em regime permanente é caracterizado por uma grandeza denominada de resistência térmica de contato (RTC). A medida desta resistência é muito importante e diversos parâmetros podem afetar o seu valor. Entre estes, podemos citar: a rugosidade e ondulação das superfícies em contato, a carga, a história do carregamento, a direção do fluxo de calor e as propriedades mecânicas do material entre outras. Neste artigo, a resistência de contato entre dois cilindros de cobre é determinada experimentalmente, utilizando para isto, uma excitação térmica periódica. A RTC entre os corpos em contato é medida para dois valores diferentes da pressão mecânica e para diferentes topografias das superfícies em contato. Os ensaios são realizados para várias freqüências do sinal térmico. A medição da RTC é feita de forma indireta através de relações matemáticas que expressam a mesma em função da amplitude e da defasagem do sinal com relação a um dado ponto referência. Para atingir este objetivo, um dispositivo experimental foi construído. Os resultados obtidos mostram que a ondulação da superfície afeta o valor da RTC de forma mais importante que a rugosidade e que o aumento da carga sobre as amostras em teste reduziu de forma importante o valor da RTC, mostrando a grande importância da pressão mecânica sobre esta grandeza.

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

1. INTRODUÇÃO

A resistência térmica de contato (RTC) é uma grandeza que caracteriza a dificuldade encontrada pelo calor para atravessar a interface de dois materiais em contato. A origem da RTC está nas irregularidades apresentadas pelas superfícies. Devido a estas irregularidades superficiais, os verdadeiros contatos ocorrem apenas em alguns pontos discretos da interface resultando assim numa área de contato real muito pequena em relação área de contato aparente (segundo Bardon (1972), a área de contato real é da ordem de 1% da área de contato aparente). Entre os pontos de

contato real existem cavidades, que em geral, são preenchidas por um fluido intersticial que desempenha um papel fundamental na RTC. Matematicamente, a RTC é uma descontinuidade expressa através da seguinte relação:

$$R = \frac{T_1^0 - T_2^0}{\varphi} \quad (1)$$

onde T_1^0 , T_2^0 e φ são respectivamente as temperaturas extrapoladas até a superfície teórica de contato (K) e o fluxo de calor que atravessa a interface (W/m^2).

O conhecimento da RTC é uma condição necessária para solução de problemas de condução de calor onde dois ou mais corpos estão acoplados.

Apresenta-se neste artigo uma técnica de medida indireta da RTC que utiliza um sinal térmico periódico e estuda-se a influencia da pressão mecânica e da topografia da superfície sobre o valor da mesma. Descreve-se também o dispositivo experimental e o modelo matemático utilizados.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para obter o valor da RTC utilizando um sinal térmico construiu-se um dispositivo experimental no Centre de Thermique de Lyon, cuja descrição e detalhes são apresentados a seguir. Este dispositivo é mostrado na Figura 1.

A apresentação e o funcionamento do dispositivo experimental são feitos considerando o mesmo constituído de quatro sistemas que são: sistema de aplicação da carga mecânica, sistema de aquecimento, sistema de produção de vácuo e sistema de aquisição.

O sistema de aplicação da carga é constituído por um cilindro pneumático. A força aplicada sobre a amostra por este cilindro é mantida constante por uma válvula reguladora de pressão e medida por um captor de força (12) situado entre a extremidade do eixo do cilindro pneumático e o isolante (11).

O sistema de aquecimento é constituído do aquecedor (10) e de uma fonte de alimentação estabilizada (4). O aquecedor é feito de um disco de níquel de 42 mm de diâmetro e 4 mm de espessura. Dentro deste disco de níquel é feita uma cavidade de 3,2 mm de profundidade, onde é colocada uma resistência elétrica feita com fio "thermocoax" e bobinada em dupla espiral, a fim de eliminar os efeitos de correntes parasitas provocadas pelo fenômeno de indução elétrica. 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 retificado a fim de proporcionar uma superfície plana e garantir um bom contato entre o aquecedor e a amostra. Para evitar as perdas pela parte superior do aquecedor, um isolante (11) feito de Vespel ($\lambda=0,47 \text{ W/mK}$) é colocado entre o aquecedor e o captor de força.

Para produzir uma potência periódica com uma determinada freqüência, utiliza-se uma fonte de alimentação estabilizada (4) controlada por computador (2) através de um programa feito em Viewdac. Desta forma, comanda-se um sinal periódico para alimentação, a qual fornece a tensão retificada de 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). Esta tensão gera uma potência elétrica periódica, P_e (W), produzida no aquecedor dada por:

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

onde P_m é a potência média (W) e ω é a freqüência térmica (rad/s), que é o dobro da freqüência elétrica.

O sistema de refrigeração é constituído de um banho regulador de temperatura (1) que mantém a temperatura do fluido de refrigeração (água). Este fluido absorve o calor que atravessa a amostra em teste.

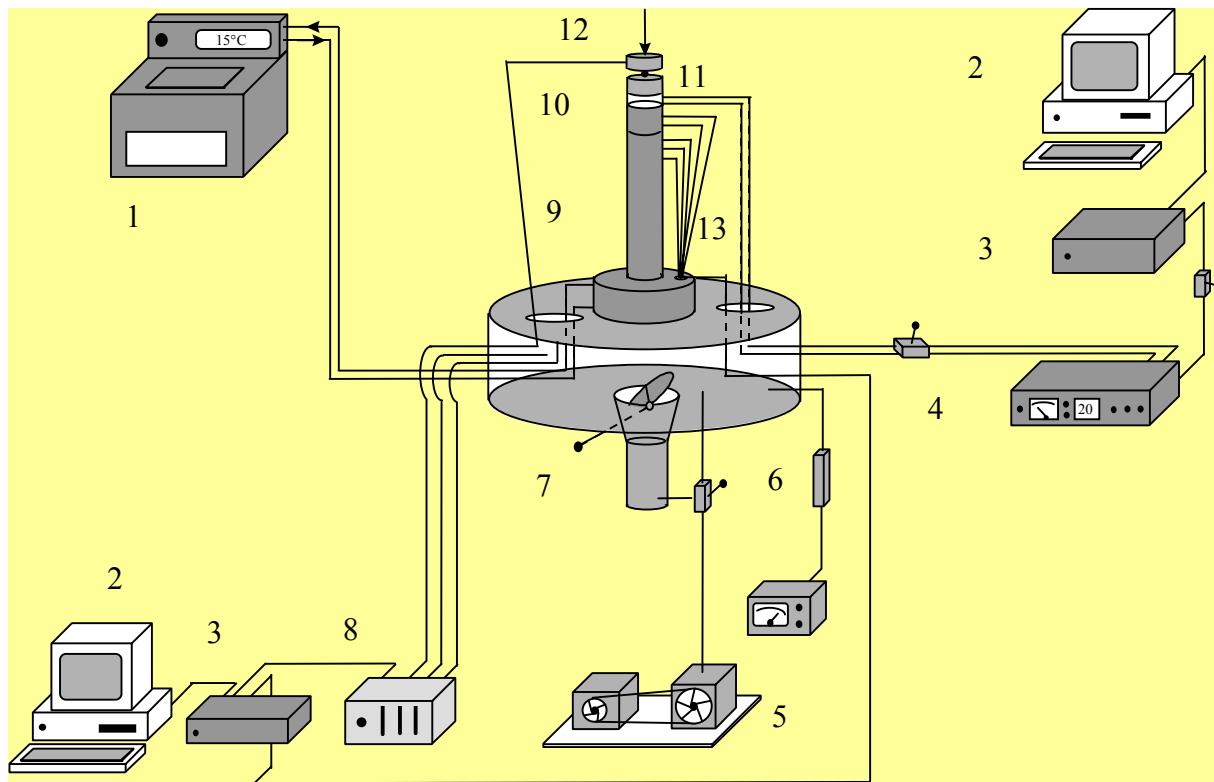


Figura 1. Dispositivo experimental.

O sistema de vácuo é constituído de uma bomba de palhetas (5) e de uma bomba de difusão de óleo (7) que produz o vácuo dentro de uma câmara cilíndrica de vidro, onde é colocada a amostra para o ensaio. Este vácuo, da ordem de 2 Pa, é medido com um manômetro de vácuo tipo Pirani (6).

O sistema de aquisição é constituído de duas unidades Keithley K500/575 (3). Uma das unidades é utilizada para geração da potência periódica enquanto a outra é utilizada para aquisição das tensões registradas pelos termopares. A resolução máxima teórica da carta de aquisição de temperaturas é de 1,5 μ V (0,04°C) para termopares do tipo K. A amostra testada é constituída de dois cilindros (9 e 10).

3. AMOSTRAS ENSAIADAS

A amostra testada é constituída de dois cilindros (9 e 10) de cobre comercial com 42 mm de diâmetro e 10 e 90 mm de altura respectivamente. Como o cobre é um ótimo condutor de calor pode-se trabalhar com freqüências elevadas, pois, o amortecimento das variações de temperatura ao longo da amostra é pequeno e consequentemente se tem um sinal mensurável nas diversas posições onde os termopares são instalados.

As evoluções de temperatura na amostra são registradas por sete termopares tipo K (cromel-alumel) (13) de 80 μ m de diâmetro que são soldados sobre a mesma 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 (Figura 2).

Para faixa de temperatura utilizada nos ensaios (inferior a 60°C), a relação entre a mesma em °C e a tensão em µV do termopar tipo K é linear. Desta forma, pode-se utilizar diretamente as tensões em µV no modelo no lugar das temperaturas em °C.

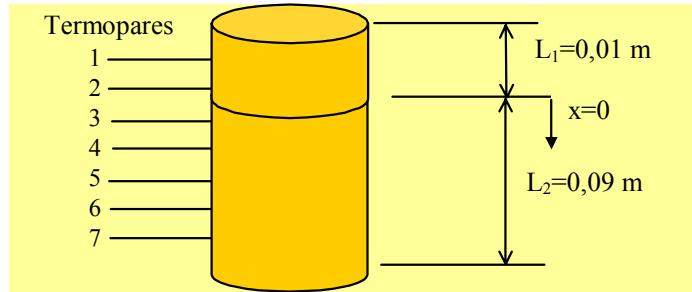


Figura 2. Amostra usada para testes.

As superfícies de contato na amostra 1 foram preparadas com o processo de retificação e apresentaram o seguinte perfil bruto:

a) Cilindro superior (ver Figura 3)

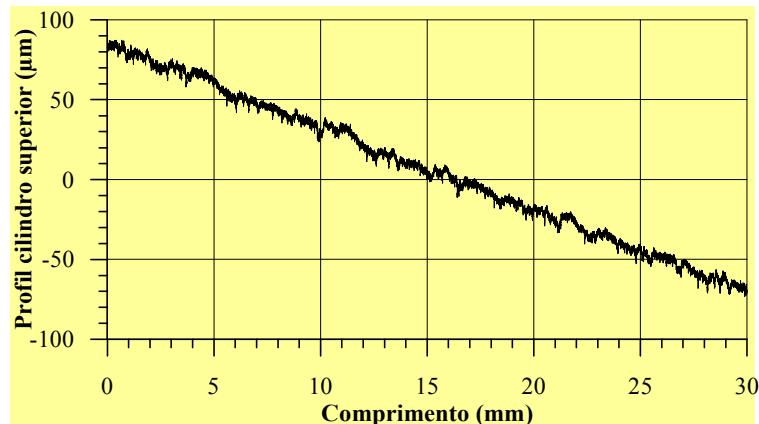


Figura 3. Perfil bruto do cilindro superior.

b) Cilindro inferior (ver Figura 4)

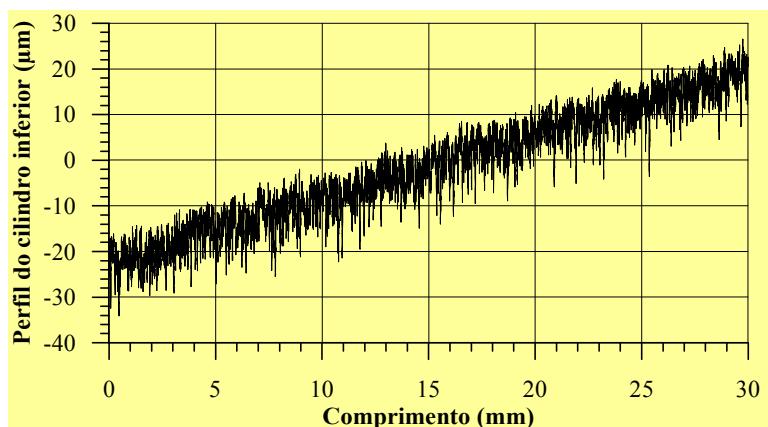


Figura 4. Perfil bruto do cilindro inferior.

A rugosidade equivalente do conjunto é de 4,429 µm

A amostra 2 teve suas superfícies de contato preparadas no torno e apresentaram os seguintes perfis:

- a) Cilindro superior (ver Figura 5)

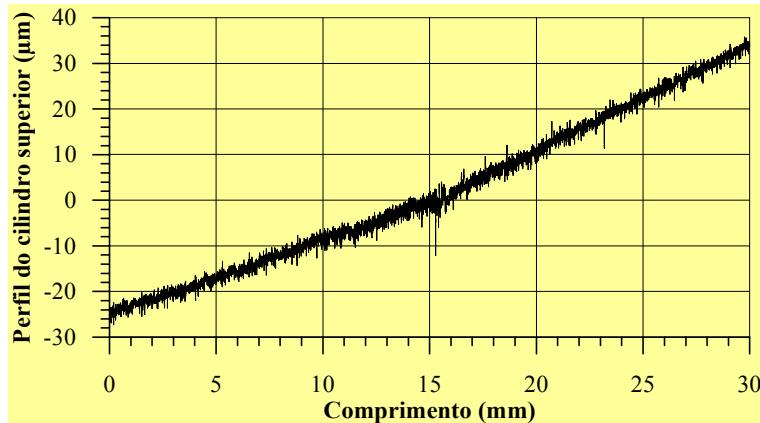


Figura 5. Perfil bruto do cilindro superior.

- b) Cilindro inferior (ver Figura 6)

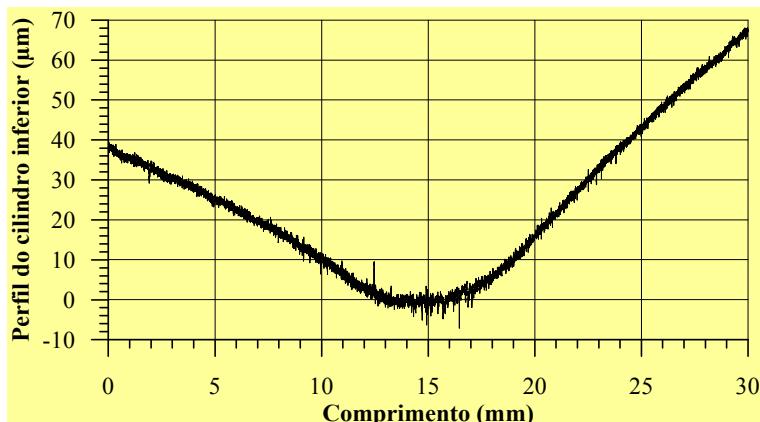


Figura 6. Perfil bruto do cilindro inferior.

A rugosidade equivalente do conjunto é de 1,309 μm

4. MODELO

O objetivo deste artigo é determinar a RTC utilizando um sinal periódico com diferentes freqüências e verificar o efeito da pressão mecânica e da topografia da superfície sobre a mesma. 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 o modelo que permite determinar a distribuição de temperatura nos dois corpos em contato é dado por:

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

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

$$\lambda \frac{\partial T_1(-L_1, t)}{\partial x} = \varphi_0 + \varphi_0 \cos(\omega t) \quad (6)$$

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

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

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

onde T_i é a temperatura (K) no cilindro i ; x é a coordenada espacial (m), a é a difusividade térmica (110×10^{-6} m²/s para o cobre utilizado), t é o tempo (s), 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/m²), $\omega = 2\pi f$ (f é a freqüência do sinal do térmico em Hz) e R é a resistência térmica de contato (Km²/W).

Fazendo $\theta_i(x, t) = T_i(x, t) - T_\infty$, temos:

$$\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta_i}{\partial t}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

$$\theta_1(x, 0) = 0 \quad (11)$$

$$\theta_2(x, 0) = 0 \quad (12)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta_1(-L_1, t)}{\partial x} = \varphi_0 + \varphi_0 \cos(\omega t) \quad (13)$$

$$\theta_1(0, t) - \theta_2(0, t) = -R\lambda \frac{\partial \theta_1(0, t)}{\partial x} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \theta_1(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \theta_2(0, t)}{\partial x} \quad (15)$$

$$\theta_2(L_2, t) = 0 \quad (16)$$

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 transiente ligada a condição inicial tende a zero conforme mostrado por Carslaw e 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. A solução deste problema é apresentada em Filho (1998).

A solução que nos interessa é apenas a componente senoidal. 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:

$$\frac{T_{s2}(x, t)}{T_{sr}(x_r, t)} = \frac{-\{2\sinh[M(x - L_2)]\}}{\{2MR\lambda \cosh(ML_2) \cdot \cosh(Mx_r) - 2\sinh[M(x_r - L_2)]\}} \quad (17)$$

onde

$$M = m(1 + j), \quad m = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad e \quad j = \sqrt{-1} \quad (18)$$

M é, portanto, um número complexo.

A razão de temperaturas, Eq. (17), tem uma amplitude, A (adimensional), e uma defasagem, Ψ (graus), dada por:

$$A(x, x_r) = \left[\frac{(f_{2R}(x))^2 + (f_{2I}(x))^2}{(f_R(x_r))^2 + (f_I(x_r))^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$\Psi(x, x_r) = \arctg \left[\frac{f_I(x_r)}{f_R(x_r)} \right] - \arctg \left[\frac{f_{2I}(x)}{f_{2R}(x)} \right] \quad (20)$$

onde

$$\begin{aligned} f_R(x_r) &= 2mR\lambda \{ \cos[m(L_2 + x_r)] \cosh[m(L_2 + x_r)] - \sin[m(L_2 + x_r)] \\ &\quad \sinh[m(L_2 + x_r)] + \cos[m(L_2 - x_r)] \cosh[m(L_2 - x_r)] - \sin[m(L_2 - x_r)] \\ &\quad \sinh[m(L_2 - x_r)] \} - 4 \cos[m(x_r - L_2)] \sinh[m(x_r - L_2)] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f_I(x_r) &= 2mR\lambda \{ \sin[m(L_2 + x_r)] \sinh[m(L_2 + x_r)] + \cos[m(L_2 + x_r)] \\ &\quad \cosh[m(L_2 + x_r)] + \sin[m(L_2 - x_r)] \sinh[m(L_2 - x_r)] + \\ &\quad \cos[m(L_2 - x_r)] \cosh[m(L_2 - x_r)] \} - 4 \sin[m(x_r - L_2)] \cosh[m(x_r - L_2)] \end{aligned} \quad (22)$$

$$f_R(x) = -4 \cos[m(x - L_2)] \sinh[m(x - L_2)] \quad (23)$$

$$f_I(x) = -4 \sin[m(x - L_2)] \cosh[m(x - L_2)] \quad (24)$$

A partir da expressão da amplitude, eq. (19), obtém-se uma equação do segundo grau em R ($CR^2 + DR + E = 0$), enquanto que da expressão da defasagem, obtém-se uma equação do primeiro grau em R ($FR + G = 0$). A RTC é determinada utilizando-se uma média aritmética das resistências obtidas para cada um dos cinco termopares instalados no cilindro inferior (como referência, adota-se o termopar instalado no cilindro superior).

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir das medidas das variações periódicas de temperaturas realizadas pelos termopares, identifica-se 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 um (4000 pontos no total) e utilizando-se um programa desenvolvido por Press et al. (1992), que usa o método de Levenberg-Marquardt.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para amostra 1, os ensaios foram feitos num vácuo de 2 Pa, onde primeiro se utilizou uma pressão mecânica de contato 2,21 MPa e em seguida uma pressão mecânica de 5,79 MPa. Em cada ensaio foi usada uma freqüência de excitação térmica diferente. As freqüências utilizadas foram: 0,010 Hz, 0,015 Hz, 0,020 Hz, 0,0303 Hz, 0,040 Hz, 0,602 Hz, 0,079 Hz, 0,100 Hz. Os valores das

resistências de contato determinados através das expressões de R a partir das eqs. (19) e (20) são apresentados nas Figuras 7 e 8. Pode-se constatar 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, que para o caso de deformações plásticas das asperezas, é proporcional a razão entre a pressão mecânica e a microdureza do material.

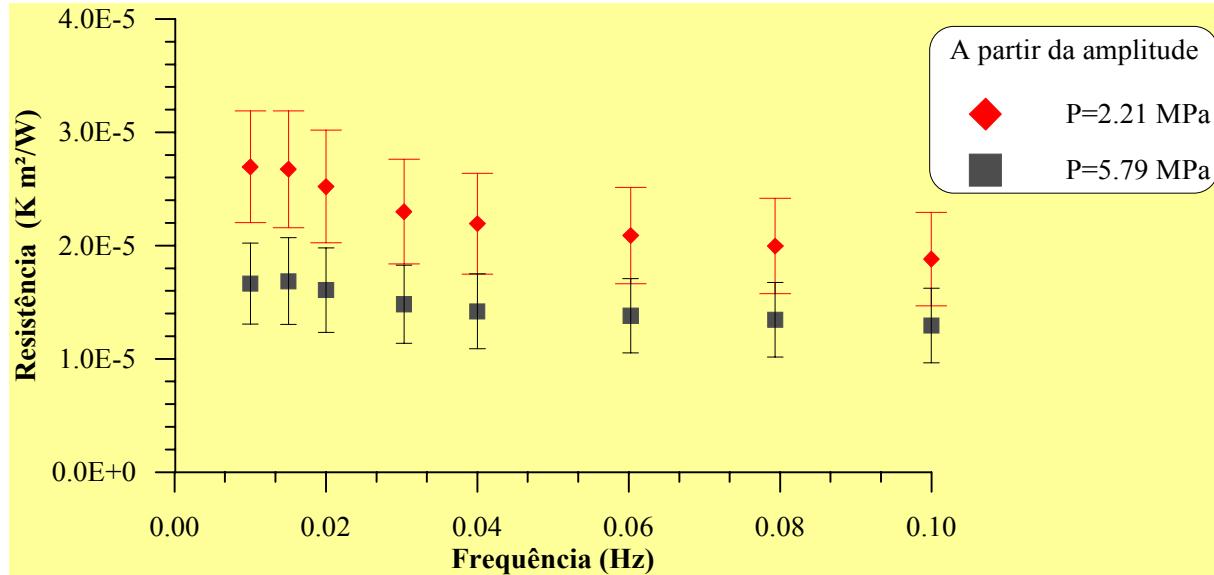


Figura 7. RTC para amostra 1 a partir da equação (19) (referência: termopar 1).

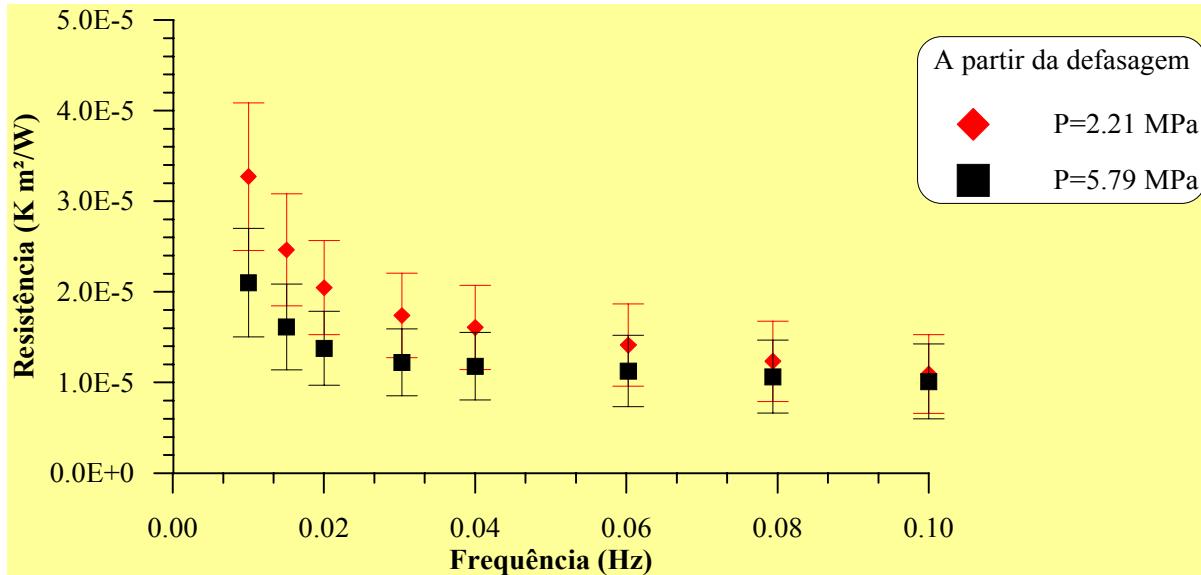


Figura 8. RTC para amostra 1 a partir da equação (20) (referência: termopar 1).

As Figuras 9 e 10 apresentam a RTC em função da freqüência para amostra 2 para os valores 2,12 MPa e 5,80 MPa da pressão mecânica de contato. Observa-se nestas figuras que os valores da RTC em função da freqüência apresentam valores mais elevados da RTC que aqueles das Figuras 7 e 8, apesar de apresentarem uma rugosidade inferior. Isto ocorre devido a fato que o cilindro inferior apresenta uma cavidade no seu núcleo (ver Figura 6), permitindo que o contato ocorra apenas nas extremidades da amostra, o que torna a área de contato menor e em consequência uma RTC maior. Este fato mostra que a presença de fortes ondulações nas superfícies de contato afeta de forma mais importante o valor da RTC que a rugosidade superficial.

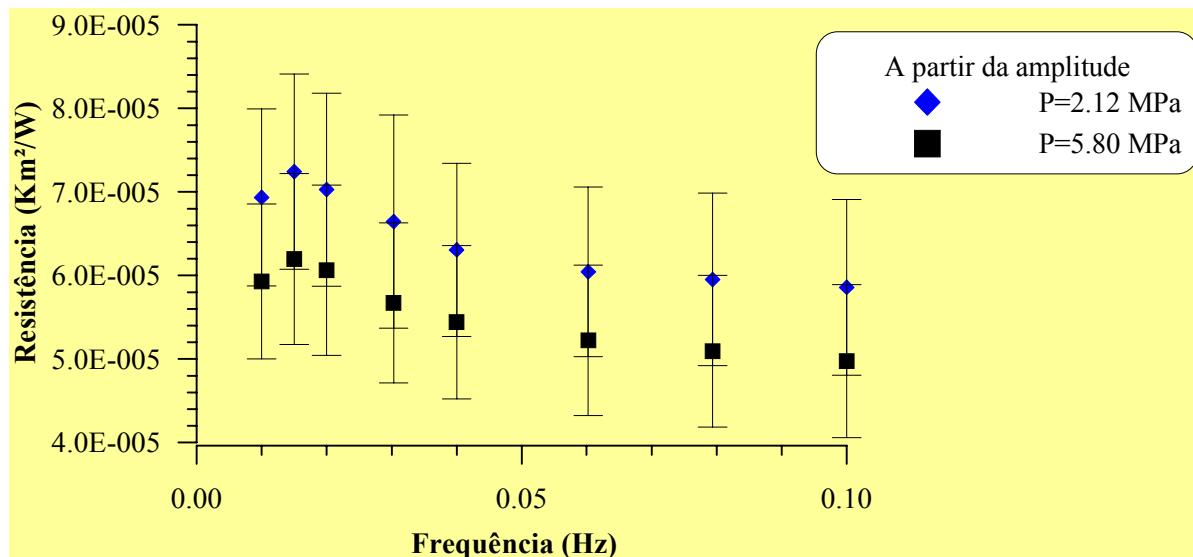


Figura 9. RTC para amostra 2 (referência: termopar 1).

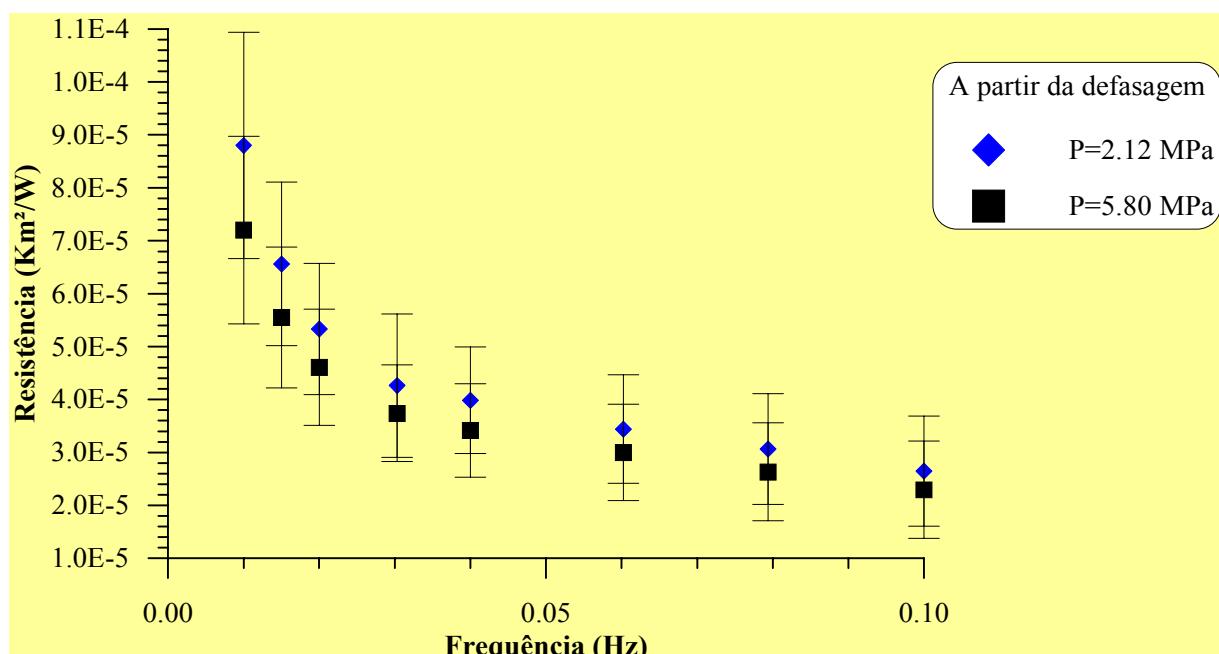


Figure 10. RTC para amostra 2 (referência: termopar 1).

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. Os resultados experimentais mostraram que quando se aumenta a pressão mecânica de contato a RTC diminui. O efeito da rugosidade não pode ser simplesmente analisado fazendo uma profilometria das superfícies para medição da mesma. É preciso também se conhecer bem a planicidade das superfícies a fim de se eliminar os efeitos das ondulações superficiais, que são mais importantes. Isto pode ser verificado na amostra 2 que, apesar de ter uma rugosidade inferior a da amostra 1, apresentou uma RTC superior, mostrando que o efeito das ondulações são mais importantes que o da rugosidade. Portanto, a afirmativa que a RTC diminui quando a rugosidade superficial diminui só é válida quando informações precisas da planicidade das superfícies são fornecidas, o que nem sempre é apresentado na literatura.

8. 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.

9. REFERÊNCIAS

- Bardon, J. P. "Introduction à l'étude des résistances thermiques de contact", *Rév. Gén. Therm.*, 1972, N° 125, pp. 429-445.
- 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.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

THE EFFECT OF SOME PARAMETERS ON THE THERMAL RESISTANCE OF CONTACT

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 - France. E-mail: timcethil@insa-lyon.fr

Abstract. Systems formed by the union of two or more bodies are common in several engineering applications. Many of these systems need to dissipate or to maintain the energy in its interior. When a heat flows passes through such systems an additional temperature drop is observed at the contact interface that is characterized by the thermal contact resistance at steady state (RTC). The measure of this resistance is very important and several parameters can affect its value. Among these parameters we can mention: the roughness and waviness of the surfaces in contact, the load, the history of the loading, the direction of the heat flows and the mechanical properties of the material among another. In this article, the contact resistance between two copper cylinders is determined experimentally, using for this, a periodic thermal excitation. RTC among the bodies in contact is measured for two values different from the mechanical pressure and for different topographies of the surfaces in contact. The tests are accomplished for several frequencies of the thermal sign. The measurement of RTC is made through mathematical relationships that express it in function of the amplitude and the phase. To reach this objectify, an experimental device was built. The results obtained show that the surface waviness affects the value of RTC in a more important way than the roughness and that the increase of the load on the samples in test reduced in an important way the value of RTC, showing the great importance of the mechanical pressure about this greatness.

Keywords: Contact Resistance, Contact Conductance, Periodic Regime.