

A RESISTENCIA TERMICA DE CONTATO

Celso Rosendo Bezerra Filho

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Aprígio Veloso, 882 Campina Grande, PB, Brasil CEP 58109-970

Michel Laurent

Centre de Thermique de Lyon
20, Av. Albert Einstein Bât. 404, Villeurbanne, France CEP 69621

Martim Raynaud

Centre de Thermique de Lyon
20, Av. Albert Einstein Bât. 404, Villeurbanne, France CEP 69621

Resumo

Quando dois corpos estão em contato e um fluxo de calor os atravessa, observa-se uma queda adicional de temperatura na interface que tem sua origem nas irregularidades apresentadas pelas superfícies em contato. Em regime permanente, a relação entre a queda de temperatura na interface e o fluxo de calor permite definir uma grandeza chamada de resistência térmica de contato (RTC). O interesse na determinação da RTC tem recebido cada vez mais atenção, tendo em vista que em algumas áreas, como a microeletrônica, por exemplo, ela tem um papel extremamente importante na dissipação de calor. A RTC é afetada por diversos fatores. Em razão da grande quantidade de parâmetros que afeta o valor da RTC, sua determinação exata se torna extremamente difícil e os modelos existentes conseguem apenas dar uma idéia de sua ordem de grandeza. Neste artigo, apresenta-se e comenta-se a respeito de uma série de parâmetros que intervêm diretamente no valor da RTC.

Palavras-chave: Resistência de contato, Resistência térmica, Condutância térmica,.

1. INTRODUÇÃO

As situações onde se é preciso conhecer as distribuições de temperatura no interior de dois corpos em contato e a quantidade de calor trocada entre eles são muito comuns em numerosas aplicações da engenharia. Para se determinar essas distribuições de temperatura é necessário escrever no nível do contato uma condição para passagem do calor, afim de se resolver o modelo matemático que traduz o campo de temperatura no interior dos dois corpos.

Em regime permanente, observa-se nas vizinhanças da interface de contato um salto aparente de temperatura que tem sua origem nas irregularidades das superfícies dos materiais. Este salto de temperatura é tradicionalmente caracterizado pela resistência térmica de contato (RTC) que permitirá escrever a condição de passagem referida acima.

O estudo da RTC começou a ganhar uma grande importância a partir dos anos 50 na área de transferência de energia. Hoje, o grande número de pesquisas sobre a RTC está ligada ao desenvolvimento de vários setores da atividade tecnológica, como na indústria aeroespacial, nos propulsores nucleares, nos motores de automóveis, na microeletrônica, etc.

2. DEFINIÇÃO DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO (RTC)

A definição da RTC pode ser apresentada analisando-se a transferência de calor e o campo de temperaturas em regime permanente no interior de dois materiais em contato. Considere dois corpos, constituídos dos materiais 1 e 2, em contato (Figura 1). Seja ϕ o fluxo de calor que atravessa a superfície S . Se o contato é perfeito, os campos de temperatura $T_1(x)$ e $T_2(x)$ não sofrem nenhuma perturbação na interface de contato (Figura 1a). Esta é uma situação ideal na qual as superfícies são perfeitamente lisas e o contato é dito perfeito. No caso real, Figura 1b, as superfícies apresentam irregularidades e o contato não é perfeito. A presença das irregularidades superficiais faz com que apenas alguns picos de rugosidade se toquem e em decorrência disto a área de contato real é muito inferior a área de contato aparente (da ordem de 1% da área de contato real segundo Bardon *et al.*, 1971).

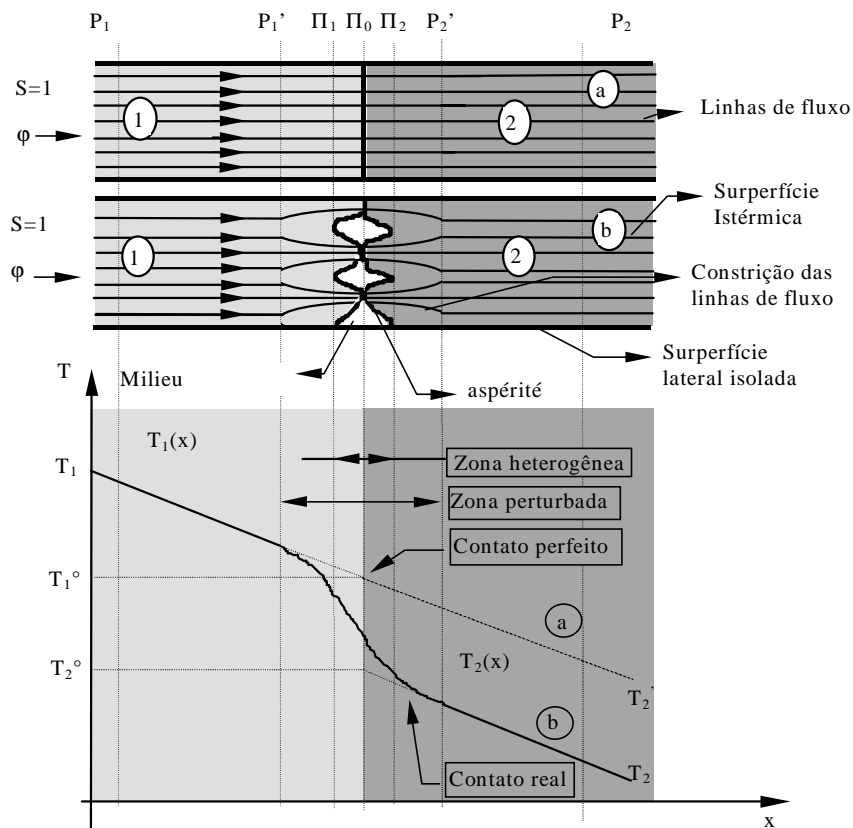


Figura 1. Campo de temperatura em dois sólidos: a) contato perfeito e b) contato imperfeito (Fourcher e al., 1975)

As imperfeições superficiais na interface constitui um obstáculo a passagem do calor e são a origem da perturbação no campo de temperatura (zona perturbada) próximo do contato onde se pode distinguir uma zona heterogênea na qual se encontram as rugosidade superficiais e o fluido intersticial. Esta perturbação é representada pelo esquema da RTC que supõe nula a espessura da zona perturbada e substitui as variações de temperatura dentro desta zona por uma brusca variação de temperatura, $T_1^0 - T_2^0$ (obtidas por extrapolação dos campos

de temperatura até a interface), localizada na interface teórica de contato dos dois sólidos. Matematicamente, a RTC por unidade de área é dada por:

$$R = (T_1^0 - T_2^0) / \phi \quad (1)$$

3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR ATRAVÉS DO CONTATO

Devido as irregularidades superficiais, duas vias são possíveis para passagem do calor de um meio a outro: uma através do contato sólido-sólido entre os picos de rugosidade e a outra através do fluido intersticial que ocupa os espaços vazios das irregularidades superficiais. Desta forma, pode-se verificar, como apresentado por Snaith *et al.* (1986), que os mecanismos de transferência de calor através destas vias são:

- a) condução através das superfícies reais de contato
- b) convecção e condução através do fluido intersticial
- c) radiação no interior dos espaços intersticiais

Em razão da pequena dimensão das cavidades do espaço intersticial, a transferência de calor por convecção pode ser desprezada; desta forma, considera-se apenas a condução de calor através do fluido.

A contribuição da radiação é desprezível quando as temperaturas são baixas. Para superfícies metálicas em contato, a contribuição da radiação raramente excede a 2% da condutância global se as temperaturas são inferiores a 900 K (Snaith *et al.*,1986).

Para os casos em que a convecção e a radiação são desprezíveis, o fluxo de calor é puramente condutivo e a resistência térmica total pode ser considerada como a soma das seguintes componentes:

- a) resistência das regiões fora da zona de constrição
- b) resistência devido a constrição macroscópica das linhas de fluxo provocadas pelas ondulações das superfícies em contato (Figura 2a)
- c) resistência devido a constrição microscópica das linhas de fluxo nos pontos de contato real (Figura 2b)

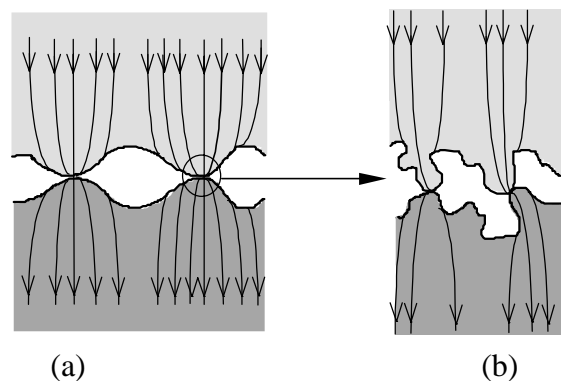


Figura 2: (a) Constrição macroscópica e (b) Constrição microscópica

4. PARÂMETROS QUE AFETAM O VALOR DA RTC

A RTC não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas um parâmetro que caracteriza a dificuldade encontrada pelo calor ao passar de um meio a outro. Estudos apresentados por Laurent (1969), Bardon *et al.* (1971) e Snaith *et al.* (1986) mostram a influência de uma grande quantidade de parâmetros que afetam de maneira importante o valor da RTC, entre os quais podemos citar:

- a) o estado geométrico das superfícies antes e depois de serem colocadas em contato (rugosidade, planicidade, etc.)
- b) as distribuições das superfícies em contato real
- c) as formas e volumes dos espaços intersticiais
- d) a espessura das camadas superficiais (óxidos, etc)
- e) a condutividade térmica dos sólidos em contato e do meio intersticial
- f) a história do carregamento mecânico,
- g) a direção do fluxo de calor, etc.

Estes parâmetros, por sua vez dependem de outros parâmetros como:

- a) as propriedades mecânicas dos materiais (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, limite elástico, dureza, etc.)
- b) a pressão mecânica de contato
- c) a pressão do fluido intersticial
- d) a natureza química dos compostos superficiais (oxidação, cementação, etc)
- e) a temperatura
- f) o tempo, etc

A predição teórica da RTC não pode ser feita, portanto, de maneira rigorosa, pois é muito difícil avaliar precisamente todos estes parâmetros.

A influência de alguns destes parâmetros é apresentada abaixo.

4.1 Influência da pressão mecânica de contato

A pressão mecânica de contato é o parâmetro mais importante que afeta o valor da RTC. Os estudos de Laurent (1969) e Bardon (1971), entre outros, mostram que a resistência de contato diminui com o aumento da pressão mecânica.

Quando se coloca dois corpos em contato pela primeira vez e aumenta-se a carga mecânica até atingir um valor P_m , as variações da RTC são frequentemente mais fortes devido as deformações elásticas e plásticas que ocorrem nas superfícies (curva A). Quando sobre as mesmas amostras os testes são feitos no sentido inverso, ou seja, aliviando-se a carga mecânica, a RTC não retorna mais ao seu valor inicial, pois as deformações plásticas que ocorrem em alguns picos em contato modificaram de maneira permanente o estado da superfície como mostra a Figura 3.

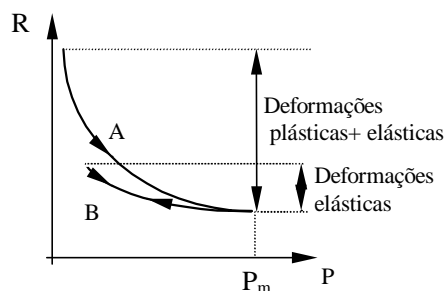


Figure 3. Resistência de contato em função da pressão mecânica (Bardon *et al.*, 1971).

Quando os testes são realizados várias vezes com pressões crescentes e decrescentes, mas inferiores a P_m , obtém-se uma curva definitiva (curva B).

As deformações plásticas sofridas pelos picos de rugosidade na curva A são bem superiores as deformações elásticas.

A RTC também varia de acordo com a velocidade de aplicação do carregamento mecânico.

4.2 Influencia do fluido intersticial

Nas cavidades formada pelos vazios entre as rugosidades pode-se encontrar o vácuo, um gás, líquido ou uma graxa. A presença de um fluido intersticial nas cavidades das superfícies em contato modifica a RTC. Esta modificação vai depender do tipo de fluido e da pressão em que ele se encontra dentro do interstício e da pressão mecânica de contato. Os estudos realizados por Bardon (1972) para diferentes gases mostram que, em geral, a medida que se aumenta a pressão mecânica tem-se como efeito uma diminuição da RTC. Este efeito se torna desprezível para pressões mecânicas muito elevadas. Isto pode ser explicado pelo fato de se aumentar a área de contato sólido sólido quando se eleva a pressão mecânica (Figura 4).

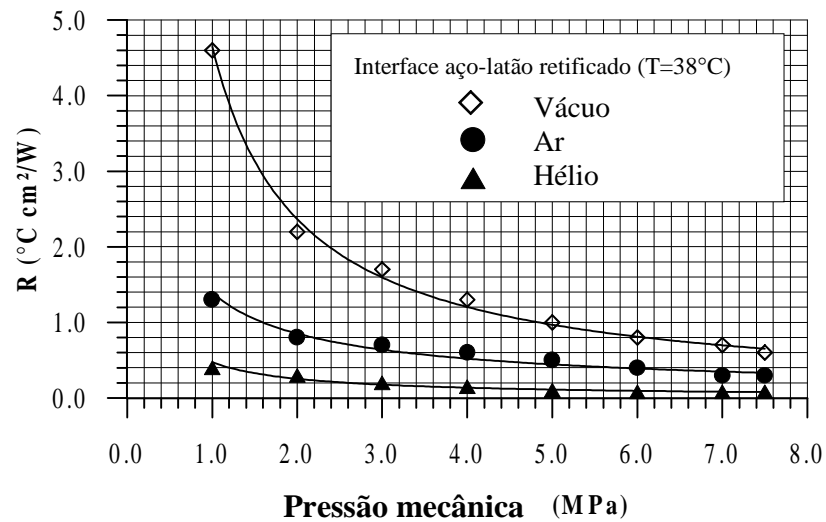


Figure 4. Variação da resistência de contato para o vácuo, ar e hélio (Bardon ,1972).

Para pressões mecânicas fracas, a presença de um gás pode diminuir de maneira importante a RTC, o que significa que a transferência de calor ocorre principalmente através do gás.

A influência da pressão do gás nos interstícios foi estudada por Laurent (1969) que mostrou que quanto maior for a mesma, menor será a RTC (Figura 5).

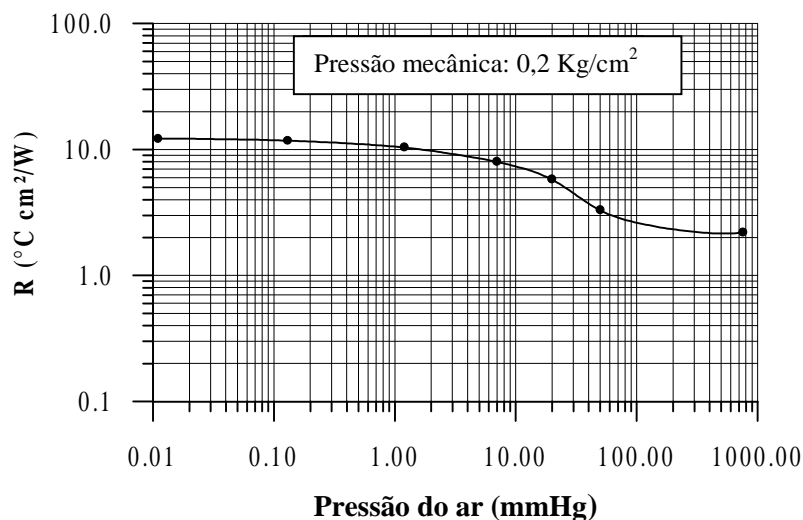


Figure 5. Efeito da pressão do gás intersticial (Laurent, 1969).

Laurent (1969) constatou também que a presença de um líquido diminui a RTC (Figura 6).

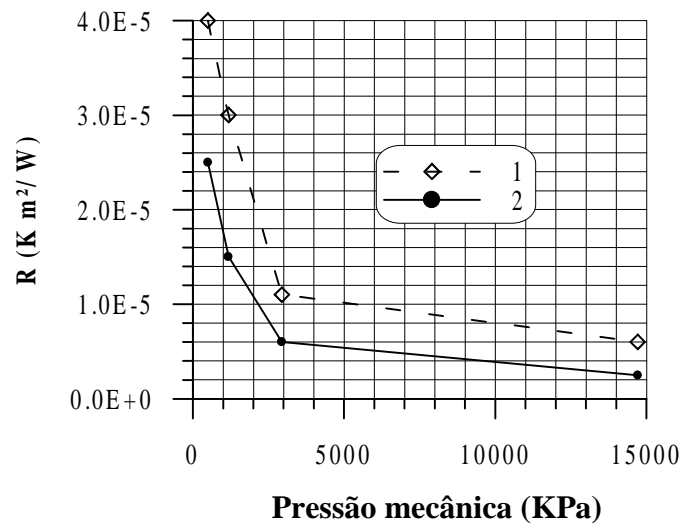


Figure 6. RTC para cargas crescentes. (1) Contato ar-cobre-cobre (2) Contato ar-cobre-óleo SISS705-cobre. Pressão do ar : 10^{-3} mmHg. Rugosidade e planicidade de cada amostra de cobre: $0.2 \mu\text{m}$ et $1.3 \mu\text{m}$ respectivamente. (Laurent, 1969)

4.3 Influencia da oxidação das superfícies

A formação de camadas de óxidos nas superfícies em contato modifica de forma importante a RTC. Sanokawa (1968) mostrou que quando sobre a superfície de contato de um metal se desenvolve uma camada de óxido, a RTC aumenta consideravelmente. Este aumento é atribuído ao fato que o óxido formado apresenta uma condutividade térmica inferior a do metal de base.

4.4 Influencia da temperatura da interface

Segundo Snaith *et al.* (1986), quando a temperatura média das superfícies em contato aumenta, a RTC diminui. Para os metais, este efeito é atribuído principalmente a diminuição da dureza do material com a temperatura.

Na presença de um fluido intersticial, a RTC pode aumentar ou diminuir quando a temperatura da interface aumenta. Este comportamento vai depender sobretudo da modificação das propriedades termofísicas do fluido.

4.5 Influencia da topografia da superfície

É muito difícil avaliar os efeitos da topografia das superfícies sobre o valor da RTC. Segundo Snaith *et al.* (1986), quando as superfícies são mais lisas ou se elas apresentam pequenas rugosidades, o contato será melhor e a RTC diminui.

Nenhuma superfície é perfeitamente plana. Elas apresentam sempre ondulações que, segundo Laurent (1969), em geral, apresentam um efeito mais importante sobre o valor da RTC que a rugosidade. Os estudos do mesmo autor mostram também que o aumento da pressão mecânica praticamente não modifica a rugosidade das superfícies em contato, enquanto a RTC é fortemente afetada.

4.6 Influencia da direção do fluxo de calor

Em alguns casos, a RTC é uma função da direção do fluxo de calor através da interface. Este efeito foi observado para materiais idênticos ou não e ainda não tem uma explicação satisfatória. Segundo Stevenson *et al.* (1991), este efeito depende das características da superfície e das propriedades dos materiais em contato.

5. ORDEM DE GRANDEZA DA RTC

A ordem de grandeza da RTC depende do tipo de contato. Segundo Bardon (1988), os contatos podem ser divididos em três grandes grupos que são:

- (1) Contatos entre sólidos metálicos pressionados um contra o outro com o espaço intersticial preenchido com um fluido de baixa condutividade térmica ou o vácuo, onde a RTC se encontra na faixa de $10^{-3} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ a $10^{-4} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ (para superfícies rugosas e onduladas) e na faixa de $10^{-4} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ a $10^{-5} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ (para superfícies rugosas e planas).
- (2) Contatos entre sólidos metálicos pressionados um contra o outro com o espaço intersticial preenchido com um fluido de alta condutividade térmica, onde a RTC se encontra na faixa de $10^{-5} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ a $10^{-6} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ ou menor.
- (3) Contatos mais íntimo entre sólidos metálicos, como no caso de metais soldados ou camadas depositadas, onde a RTC é inferior ou igual a $10^{-7} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$.

6. CONCLUSÃO

Como foi visto, a RTC é uma grandeza que permite escrever uma condição de passagem no nível da interface a fim de se poder resolver problemas de condução de calor onde existem dois ou mais corpos em contato. Em razão disto, é preciso se conhecer o seu valor. Devido a grande quantidade de parâmetros que afetam o valor da RTC, uma avaliação precisa da mesma se torna extremamente difícil e o que podemos ter na realidade é um noção de sua ordem de grandeza. Na realidade, para se avaliar a RTC, precisa-se resolver simultaneamente dois problemas complexos: um térmico, ligado a questão da transferência de calor, e outro mecânico, ligado a determinação dos parâmetros superficiais que serão introduzidos no modelo térmico.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- **Bardon, J.-P., Cassagne, B., Foucher, B. et Saint-Blanquet, C.** *Bilan des principales recherches sur les résistances thermiques de contact.* Nantes : Laboratoire de Thermocinétique, 1971, 70 p. Rapport D.E.T.B. 7101
- **Bardon, J. P.** Heat Transfer at solid-solid interface : basic phenomenom, recent works. *Proc. Eurotherm*, N° 4, Nancy, 28 - 30 Juin 1988, p. 40-74.
- **Foucher, B., Bardon, J.P et Mallard, H.** Transferts de chaleur en régime périodique à l'interface de deux milieux : problèmes posé par l'écriture des conditions aux limites classiques. *Entropie*, 1975, N° 64, p. 11-26.

- **Laurent, M.** *Contribution à l'étude des échanges de chaleur au contact de deux matériaux*. Thèse de doctorat d'Etat, Fac. des Sciences de Lyon, Mars 1969, 128 p.
- **Sanokawa, K.** Heat Transfer between metallic surfaces in contact (4 reports). *Bulletin of JSME*, 1968, Vol 11, N° 44, p. 253-293.
- **Snaith, B., Probert, S. D. and O'Callaghan, P. W.** Thermal resistances of pressed contacts. *Applied Energy*, 1986, Vol. 22, p. 31-84.
- **Stevenson, P. F., Peterson, G.P. and Fletcher, L. S.** Thermal rectification in similar and dissimilar metal contacts. *Journal of Heat Transfer*, 1991, Vol. 113, p. 30-36.