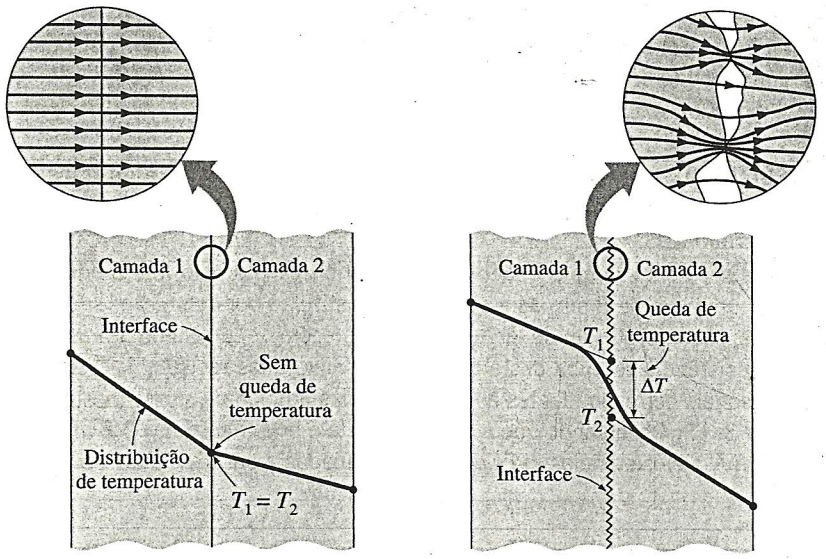

(*a*) Contato térmico ideal (perfeito) (*b*) Contato térmico real

FIGURA 3–14
Distribuição de temperatura e linhas de fluxo de calor ao longo de duas placas sólidas pressionadas uma contra a outra para o caso de contato perfeito e imperfeito.

3–2 ▪ RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO

Na análise de condução de calor através de multicamada de sólido, adotamos "perfeito contato" na interface de duas camadas e, portanto, nenhuma queda de temperatura na interface. Seria esse o caso quando as superfícies estão lisas perfeitamente e produzem um contato perfeito em cada ponto. Na realidade, porém, mesmo superfícies planas que parecem lisas aos olhos revelam-se bastante rugosas quando analisadas sob um microscópio, como mostrado na Figura 3–14, com inúmeros picos e vales. Ou seja, uma superfície é *microscopicamente rugosa*, não importa quão lisa ela aparenta ser.

Quando duas dessas superfícies são pressionadas uma contra a outra, os picos formam um bom contato material, mas os vales formam vazios preenchidos com ar. Como resultado, uma interface contém inúmeras *lacunas de ar* de tamanhos variados que funcionam como um *isolamento* devido à baixa condutividade térmica do ar. Assim, uma interface oferece alguma resistência à transferência de calor, e essa resistência por unidade de área é chamada de **resistência térmica de contato**, R_c. O valor de R_c é determinado experimentalmente usando uma montagem similar àquela mostrada na Figura 3–15 e, como era de se esperar, existe uma grande dispersão dos dados, devido à dificuldade de caracterizar as superfícies.

Considere a transferência de calor através de duas barras metálicas de uma área transversal A, que são pressionadas uma contra a outra. A transferência de calor através da interface destas duas barras é a soma da transferência de calor através dos *pontos de contato sólido* e das *lacunas* nas áreas em que não há contato e pode ser expressa como

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{contato}} + \dot{Q}_{\text{lacuna}} \qquad \textbf{(3–25)}$$

Também pode ser expressa em uma forma análoga à lei de Newton do resfriamento, como

$$\dot{Q} = h_c A \, \Delta T_{\text{interface}} \qquad \textbf{(3–26)}$$

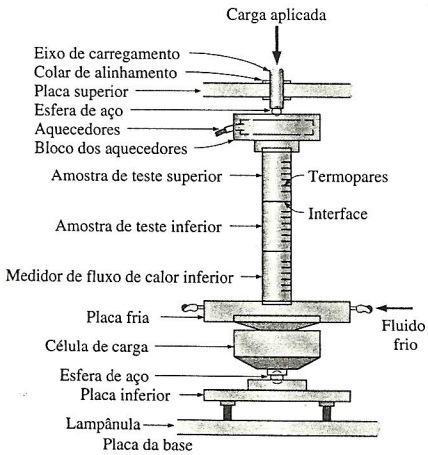

FIGURA 3–15
Uma montagem experimental típica para a determinação da resistência térmica de contato (de Song et al.).

em que A é a área aparente de interface (que é a mesma que a área transversal das barras) e $\Delta T_{\text{interface}}$ é a diferença efetiva de temperatura na interface. A quantidade h_c, que corresponde ao coeficiente de transferência de calor por convecção, é chamada de **condutância térmica de contato** e é expressa como

$$h_c = \frac{\dot{Q}/A}{\Delta T_{\text{interface}}} \qquad (\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}) \tag{3–27}$$

Ela está relacionada com a resistência térmica de contato por

$$R_c = \frac{1}{h_c} = \frac{\Delta T_{\text{interface}}}{\dot{Q}/A} \qquad (\text{m}^2 \cdot \text{°C/W}) \tag{3–28}$$

Ou seja, a resistência térmica de contato é o inverso da condutância térmica de contato. Normalmente, a condutância térmica de contato é reportada na literatura, mas o conceito de resistência térmica de contato serve como um melhor veículo para explicar o efeito da interface sobre a transferência de calor. Note que R_c representa a resistência térmica de contato *por unidade de área*. A resistência térmica para toda a interface é obtida dividindo R_c pela área de interface aparente A.

A resistência térmica de contato pode ser determinada a partir da Equação 3–28 medindo-se a queda de temperatura na interface e dividindo-a pelo fluxo de calor sob condições permanentes. O valor da resistência térmica de contato depende da *rugosidade superficial* e das *propriedades do material*, bem como da *temperatura* e da *pressão* na interface e do *tipo de fluido* aprisionado na interface. A situação torna-se mais complexa quando placas são apertadas com parafusos ou rebites, uma vez que a pressão da interface, neste caso, não é uniforme. A resistência térmica de contato, nesse caso, também depende da espessura da chapa, o raio de parafuso e do tamanho da zona de contato. A resistência térmica de contato *diminui* com a *diminuição da rugosidade da superfície* e *com o aumento da pressão da interface*, como seria de se esperar. A maior parte dos valores determinados experimentalmente de resistência térmica de contato está entre 0,000005 e 0,0005 $\text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$ (correspondente à faixa de condutância térmica de contato de 2000 a 200000 $\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$).

Quando analisamos a transferência de calor em um meio composto por duas ou mais camadas, a primeira coisa que precisamos saber é se a resistência térmica de contato é *significativa* ou não. Podemos responder a esta pergunta comparando a magnitude da resistência térmica das camadas com os valores característicos de resistência térmica de contato. Por exemplo, a resistência térmica de uma camada de 1 cm de espessura de um material isolante por unidade de superfície é

$$R_{c,\,\text{isolamento}} = \frac{L}{k} = \frac{0{,}01\ \text{m}}{0{,}04\ \text{W/m} \cdot \text{°C}} = 0{,}25\ \text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

enquanto que, para uma camada de cobre de 1 cm de espessura, ela é de

$$R_{c,\,\text{cobre}} = \frac{L}{k} = \frac{0{,}01\ \text{m}}{386\ \text{W/m} \cdot \text{°C}} = 0{,}000026\ \text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

Comparando os valores acima com valores típicos da resistência térmica de contato, concluímos que a resistência térmica de contato é significativa e pode até mesmo dominar a transferência de calor para bons condutores de calor, como metais, mas pode ser ignorada para condutores de calor pobres, como os

TABELA 3–1

Condutância térmica de contato para placas de alumínio com diferentes fluidos na interface para uma rugosidade superficial de 10 μm e pressão na interface de 1 atm (do Fried).

Fluido na interface	Condutância de contato, h_c, W/m² · K
Ar	3.640
Hélio	9.520
Hidrogênio	13.900
Óleo de silicone	19.000
Glicerina	37.700

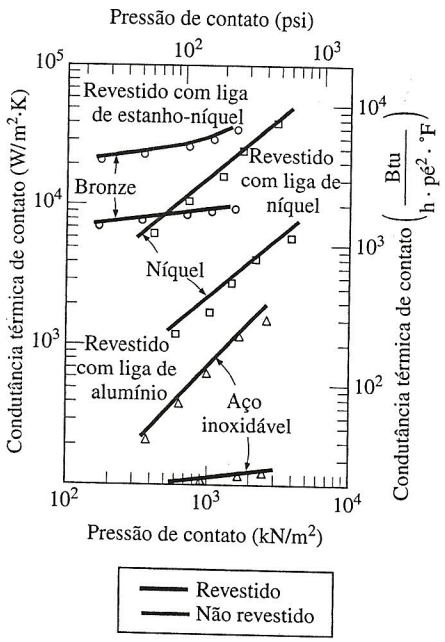

FIGURA 3–16
Efeito de revestimentos metálicos na condutância térmica de contato (do Peterson).

isolamentos térmicos. Isso não é surpreendente, uma vez que materiais isolantes consistem principalmente de espaços de ar, tal como a própria interface.

A resistência térmica de contato pode ser minimizada através da aplicação de um líquido termicamente condutor chamado de *pasta térmica*, como o óleo de silício, sobre as superfícies antes que sejam pressionadas uma contra a outra. Isso é comumente feito quando fixamos componentes eletrônicos como transistores de potência em dissipadores térmicos. A resistência térmica de contato também pode ser reduzida através da substituição do ar na interface por um melhor condutor, como o gás hélio ou hidrogênio, conforme mostrado na Tabela 3–1.

Outra maneira de minimizar a resistência de contato é inserir uma *folha metálica macia* como estanho, prata, cobre, níquel ou alumínio entre as duas superfícies. Estudos experimentais mostram que a resistência térmica de contato pode ser reduzida por um fator de até 7 colocando uma folha metálica na interface. Para uma máxima eficácia, as chapas devem ser muito finas. O efeito de revestimentos metálicos na condutância térmica de contato é mostrado na Figura 3–16 para várias superfícies metálicas.

Há uma considerável incerteza nos dados de condutância de contato relatados na literatura e cuidados devem ser tomados ao usá-los. Na Tabela 3–2, alguns resultados experimentais são apresentados para a condutância de contato entre superfícies metálicas similares e não similares para utilização nos cálculos preliminares do projeto. Note que a *condutância térmica de contato* é mais elevada (e, portanto, a resistência de contato é menor) para *metais macios* em *superfícies lisas a alta pressão*.

EXEMPLO 3–4 **Espessura equivalente para resistência de contato**

A condutância térmica de contato na interface de duas placas de alumínio de um centímetro de espessura é de 11.000 W/m² · K. Determine a espessura da placa de alumínio cuja resistência térmica é igual à resistência térmica da interface entre as placas (Figura 3–17).

SOLUÇÃO Determinar a espessura da placa de alumínio cuja resistência térmica é igual à resistência térmica de contato.

Propriedades A condutividade térmica do alumínio em temperatura ambiente é $k = 237$ W/m · K (Tabela A–3).

Análise Observando que a resistência térmica de contato é o inverso da condutância térmica de contato, a resistência térmica de contato é

$$R_c = \frac{1}{h_c} = \frac{1}{11000\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}} = 0{,}909 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Para uma unidade de superfície, a resistência térmica de uma placa plana é definida como

$$R = \frac{L}{k}$$

onde L é a espessura da placa e k é a condutividade térmica. Fazendo $R = R_c$, a espessura equivalente é determinada a partir da relação acima, que resulta

$$L = kR_c = (237\ \text{W/m} \cdot \text{K})(0{,}909 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 \cdot \text{K/W}) = 0{,}0215\ \text{m} = \mathbf{2{,}15\ cm}$$

TABELA 3–2

Condutância térmica de contato de algumas superfícies metálicas no ar (a partir de várias fontes)

Material	Condição da superfície	Rugosidade, μm	Temperatura, °C	Pressão, MPa	h_c,* W/m² · °C
Pares metálicos idênticos					
416 Aço inoxidável	Polido	2,54	90–200	0,17–2,5	3800
304 Aço inoxidável	Polido	1,14	20	4–7	1900
Alumínio	Polido	2,54	150	1,2–2,5	11400
Cobre	Polido	1,27	20	1,2–20	143000
Cobre	Fresado	3,81	20	1–5	55500
Cobre (vácuo)	Fresado	0,25	30	0,17–7	11400
Pares metálicos desiguais					
Aço inoxidável				10	2900
Alumínio		20–30	20	20	3600
Aço inoxidável				10	16400
Alumínio		1,0–2,0	20	20	20800
Aço Ct-30–				10	50000
Alumínio	Polido	1,4–2,0	20	15–35	59000
Aço Ct-30–				10	4800
Alumínio	Fresado	4,5–7,2	20	30	8300
				5	42000
Alumínio-Cobre	Polido	1,17–1,4	20	15	56000
				10	12000
Alumínio-Cobre	Fresado	4,4–4,5	20	20–35	22000

* Dividir os valores dados por 5,678 para converter para Btu/uh . pé² .°F.

Discussão Note que a interface entre as duas placas oferece tanta resistência à transferência de calor quanto uma placa de alumínio de 2,15 cm de espessura. É interessante notar que a resistência térmica de contato, neste caso, é maior do que a soma das resistências térmicas de ambas as placas.

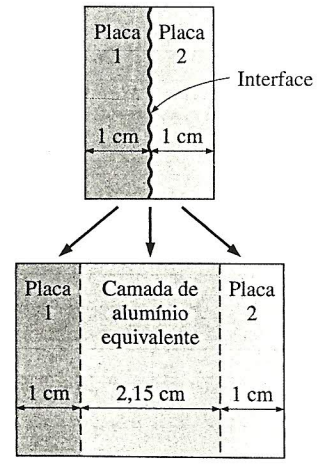

FIGURA 3–17
Esquema para o Exemplo 3–4.

EXEMPLO 3–5 Resistência de contato de transistores

Quatro transistores de potência idênticos com invólucro de alumínio estão fixados em um lado de uma placa quadrada de cobre (k = 386 W/m .°C) de 20 cm × 20 cm com 1 cm de espessura, por parafusos que exercem uma pressão média de 6 MPa (Figura 3–18). A área da base de cada transistor é de 8 cm² e cada transistor é colocado no centro de um quadrante de 10 cm × 10 cm da placa. A rugosidade da interface é estimada em cerca de 1,5 μm. Todos os transistores são cobertos por uma espessa camada de Plexiglas, que é um mau condutor de calor e, portanto, todo o calor gerado na junção do transistor deve ser dissipado para o ambiente a 20 °C através da superfície traseira da placa de cobre. O coeficiente de transferência de calor combinado de convecção e radiação na superfície traseira é de 25 W/m² · °C. Se a temperatura do transistor não deve ser

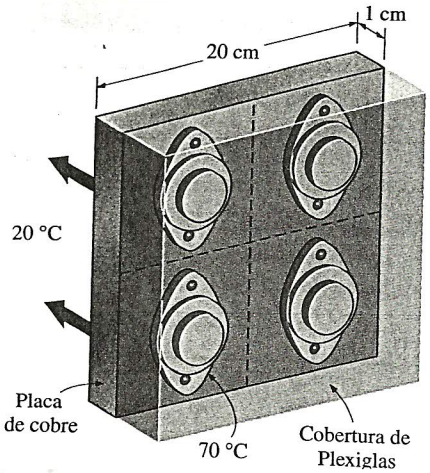

FIGURA 3–18
Esquema para o Exemplo 3–5.

superior a 70 °C, determinar a potência máxima que cada transistor pode dissipar com segurança e o salto de temperatura na interface entre o invólucro e a placa.

SOLUÇÃO Quatro transistores de potência idênticos são fixados sobre uma placa de cobre. Para uma temperatura máxima do invólucro de 70 °C, determinar a máxima potência dissipada e o salto de temperatura na interface.

Suposições **1** Existem condições operacionais permanentes. **2** A transferência de calor pode ser aproximada como sendo unidimensional, apesar de se reconhecer que a condução de calor em algumas partes da placa será bidimensional, uma vez que a área da placa é muito maior que a área da base do transistor. Porém, a grande condutividade térmica do cobre irá minimizar este efeito. **3** Todo o calor gerado na junção é dissipado através da superfície traseira da placa, pois os transistores são cobertos por uma espessa camada de Plexiglas. **4** As condutividades térmicas são constantes.

Propriedades A condutividade térmica do cobre é $k = 386$ W/m · °C. A condutância de contato é obtida a partir da Tabela 3–2 como sendo $h_c = 42.000$ W/m² · °C, o que corresponde à interface de cobre-alumínio para o caso de rugosidade de 1,17 a 1,4 μm e pressão de 5 MPa, que é suficientemente próximo ao que temos.

Análise A área de contato entre o invólucro e a placa é de 8 cm² e a área da placa para cada transistor é de 100 cm². A rede de resistência térmica deste problema consiste de três resistências em série (interface, placa e convecção), que são

$$R_{\text{interface}} = \frac{1}{h_c A_c} = \frac{1}{(42000\ \text{W/m}^2 \cdot \text{°C})(8 \times 10^{-4}\ \text{m}^2)} = 0{,}030\ \text{°C/W}$$

$$R_{\text{placa}} = \frac{L}{kA} = \frac{0{,}01\ \text{m}}{(386\ \text{W/m} \cdot \text{°C})(0{,}01\ \text{m}^2)} = 0{,}0026\ \text{°C/W}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h_o A} = \frac{1}{(25\ \text{W/m}^2 \cdot \text{°C})(0{,}01\ \text{m}^2)} = 4{,}0\ \text{°C/W}$$

O valor total da resistência térmica é, então

$$R_{\text{total}} = R_{\text{interface}} + R_{\text{placa}} + R_{\text{amb}} = 0{,}030 + 0{,}0026 + 4{,}0 = 4{,}0326\ \text{°C/W}$$

Note que a resistência térmica de uma placa de cobre é muito pequena e pode ser ignorada por completo. Então, a taxa de transferência de calor é

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{total}}} = \frac{(70 - 20)\text{°C}}{4{,}0326\ \text{°C/W}} = \mathbf{12{,}4\ W}$$

Portanto, o transistor não deverá funcionar em níveis de potência superior a 12,4 W se a temperatura do invólucro não pode ser superior a 70 °C.

O salto de temperatura na interface é determinado a partir de

$$\Delta T_{\text{interface}} = \dot{Q} R_{\text{interface}} = (12{,}4\ \text{W})(0{,}030\ \text{°C/W}) = \mathbf{0{,}37\ °C}$$

que não é muito grande. Assim, mesmo se eliminássemos completamente a resistência térmica de contato na interface, a temperatura de funcionamento do transistor seria 0,4 °C menos.