

Experiência 5: estudo dos processos de transferência de calor na **interface entre dois sólidos** – pedaço de porta de geladeira.

o que observar:

- como é a área de contato entre as superfícies sólidas – constante, irregular?
- o que existe na interface de contato entre as superfícies sólidas?
- é fácil caracterizar a interface e o que nela ocorre?
- como ocorre a transferência de calor?

Resistência térmica de contato

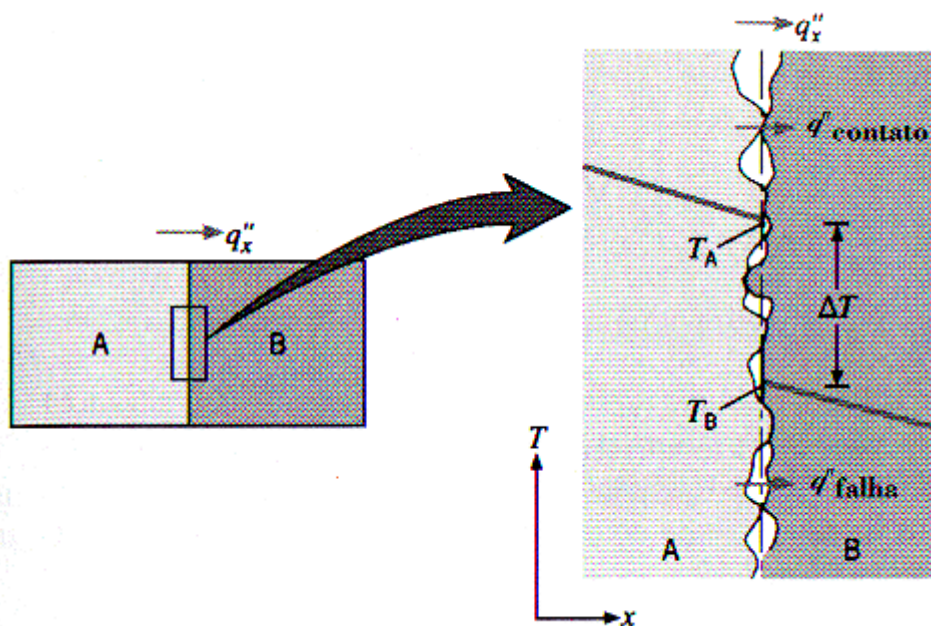


figura – queda de temperatura devido à resistência térmica de contato (Incropera & De Witt, p. 45- 4ª edição, p. 64 – 5ª edição)

"A existência de uma resistência de contato se deve principalmente aos efeitos da rugosidade da superfície. Pontos de contato se entremeiam com falhas que são, na maioria dos casos, preenchidas com ar. A transferência de calor é, portanto, devida à condução de calor através da área de contato real e à condução e/ou radiação através das falhas." (Incropera & De Witt, p. 44-4ª edição, p. 64-5ª edição)

Portfólio de:

formas de se reduzir a resistência de contato:

- aumento da área dos pontos de contato entre as paredes (redução da rugosidade, aumento na pressão de junção)
- uso de fluido com elevada condutividade térmica para preencher o espaço entre as falhas
- uso de materiais intersticiais (metais macios e graxas térmicas) ou de juntas (resinas epoxi, soldas ricas em chumbo, ligas de ouro e estanho, etc.) entre as paredes

Cabe ressaltar que a existência de vácuo eleva a resistência de contato^(por quê?) e que a predição da resistência térmica de contato não é trivial. As tabelas a seguir extraídas de Incropera & De Witt (p. 45) fornecem valores típicos para os fluxos das resistências de contato, ou seja, para a obtenção da resistência de contato deve-se multiplicar os valores tabelados pela área de troca térmica.

TABELA 3.1 Resistência Térmica de Contato em (a) Interfaces Metálicas sob Condições de Vácuo e (b) Interface de Alumínio (Rugosidade Superficial de 10 µm, Pressão de Contato de 10⁵ N/m²) com Diferentes Fluidos Interfaciais [1]

Resistência Térmica, $R''_{t,c} \times 10^4$ (m ² · K/W)				
(a) Vácuo na Interface			(b) Fluido Interfacial	
Pressão de contato	100 kN/m ²	10.000 kN/m ²		
Aço inoxidável	6-25	0,7-4,0	Ar	2,75
Cobre	1-10	0,1-0,5	Hélio	1,05
Magnésio	1,5-3,5	0,2-0,4	Hidrogênio	0,720
Alumínio	1,5-5,0	0,2-0,4	Óleo de silicone	0,525
			Glicерina	0,265

TABELA 3.2 Resistência Térmica de Contato Sólido/Sólido Representativas

Interface	$R''_{t,c} \times 10^4$ (m ² · K/W)	Fonte
Chip de silício/alumínio esmerilhado com ar (27-500 kN/m ²)	0,3 – 0,6	[2]
Alumínio/alumínio, com folha de índio (~100 kN/m ²)	~0,07	[1,3]
Aço inoxidável/aço inoxidável, com folha de índio (~3.500 kN/m ²)	~0,04	[1,3]
Alumínio/alumínio, com revestimento metálico (Pb)	0,01-0,1	[4]
Alumínio/alumínio, com graxa Dow Corning 340 (~100 kN/m ²)	~0,07	[1,3]
Aço inoxidável/aço inoxidável, com graxa Dow Corning 340 (~3.500 kN/m ²)	~0,04	[1,3]
Chip de silício/alumínio, com 0,02 mm de epóxi	0,2-0,9	[5]
Latão/latão, com 15 µm de solda à base de estanho	0,025-0,14	[6]

Leituras recomendadas:

Incropera & De Witt: p. 64-65 (5ª edição)

Kreith: p. 9-14

Exemplos recomendados para leitura:

Incropera & De Witt: exemplo 3.2 p.67

Kreith: exemplos 1.2 p. 12; 1.6 p. 23; 1.7 p. 25

Exercícios:

Exercício 01: Caracterize o perfil de temperatura quando ocorre a transferência de calor entre dois sólidos em que há resistência de contato.

Exercício 02: (exercício 3.27 Incropera ^{5ª edição}). Aproximadamente 10^6 dos componentes elétricos podem ser colocados em uma única placa de circuito integrado, com dissipação elétrica térmica na ordem de 30000W/m^2 . O chip, que é muito fino, tem sua superfície externa exposta a um líquido dielétrico com coeficiente de película $h_e=1000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $T_{\infty,e}=20^\circ\text{C}$, enquanto sua superfície interna está conectada à placa de circuito impresso. A resistência térmica de contato entre o chip e a placa é de $10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, a espessura da placa $L_p=5\text{mm}$ e condutividade térmica $k_p=1\text{W/m}\cdot\text{K}$. A outra superfície da placa está exposta ao ar ambiente com coeficiente de película $h_i=40\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $T_{\infty,i}=20^\circ\text{C}$. Pede-se:

- esboce o circuito térmico em condições de regime estacionário. Identifique as resistências térmicas, as temperaturas e fluxo de calor.
- em regime estacionário nas quais a dissipação de calor do chip é de 30000W/m^2 , qual a temperatura do chip? (*resp. $T_{\text{chip}}=49^\circ\text{C}$*)
- o valor máximo permitido para o fluxo de calor é determinado pela restrição de que a temperatura do chip não deve ultrapassar 85°C . Determinar o fluxo de calor para essas condições. (*resp. 67160 W/m^2*)

Portfolio de:

Exercício 03: (questão da PAF da turma 5C do 1º semestre de 2003) Considere um cabo elétrico pelo qual escoa uma corrente elétrica e que está exposto ao ar ambiente com temperatura superficial de 800°C . Se um revestimento delgado de um isolante for aplicado sobre o cabo com fluxo de resistência de contato de $0.02\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, qual será a temperatura do revestimento e o que deve ocorrer com a temperatura superficial do cabo? (**OBSERVAÇÃO: não é necessário fazer contas!!!**)

Exercício 04: (exemplo 1.7 p. 25 de Kreith) Uma camada de tijolos refratários com 2 polegadas de espessura ($k_{\text{tij}}=1\text{ BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^{\circ}\text{F}$) é colocada entre duas placas de aço, com espessura de $\frac{1}{4}$ de polegada ($k_{\text{aço}}=30\text{ BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^{\circ}\text{F}$). As faces dos tijolos adjacentes às placas de aço são rugosas, *oferecendo um contato sólido-sólido somente sobre 30% da área total, apresentando uma altura média das asperezas de $\frac{1}{32}$ polegada*. Se as temperaturas da superfície das placas de aço forem, respectivamente, 200° e 800°F , determine o fluxo de calor por área unitária. (resp: $3240\text{ BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2$)

Obs: *com relação ao contato tijolo/placa, 30% da área total está em contato direto enquanto para 70% da área, podemos considerar a presença de ar aprisionado. Considerando o ar aprisionado em pequenos compartimentos, os efeitos da convecção são ínfimos e podemos supor que o calor flui através do ar apenas por condução (considerar a condutividade térmica do ar de $0,021\text{ BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^{\circ}\text{F}$). Lembrar que $1\text{ ft}=12\text{ pol}$.*

Sistemas de isolamento

Isolamentos/Isolantes térmicos são materiais **de baixa condutividade térmica, projetados de modo que uma vez aplicados sobre uma superfície obtém-se uma resistência térmica global** do sistema menor que a obtida na ausência do emprego dos isolantes térmicos.

Objetivos do emprego de isolantes:

- ◆ problemas técnicos: critérios de segurança (proteção contra queimaduras); minimizar ou evitar problemas de condensação sobre uma superfície externa (por que isto não é desejado?), ...
- ◆ questões econômicas e ambientais: minimização de gastos energéticos, especificação de temperatura de efluentes
- ◆ problemas relativos a conforto ambiental (em indústrias, escritórios e em residências)

“Transferência de calor nos isolantes pode incluir os **três modos de transmissão de calor**: condução através dos materiais sólidos; condução ou convecção através do ar nos espaços vazios; e se a temperatura for suficientemente alta, troca de calor por radiação entre as superfícies da matriz sólida.” (Incropera & De Witt, p. 27-4ª edição, p. 39-5ª edição)

características desejáveis/usuais para os isolamentos: materiais porosos (com poros pequenos) de baixa condutividade térmica, de paredes finas, baixo poder higroscópico (por quê?), baixa densidade (por quê?)

- estrutura básica: isolantes com fibras, pós ou flocos – **material sólido disperso com ar**
- em todos os isolamentos, a elaboração de vácuo nos espaços vazios implica a **redução da condutividade** térmica do sistema

Projeto do sistema de isolamento – objetivo redução do custo de operação e aquisição!
Restrições – temperatura máxima suportada pelo isolamento e questões estruturais

Leituras recomendadas:

Incropera & De Witt: p.38/39 (5ª edição)
Kreith: p.35-37

Portfolio de:

Estudo dirigido:

O que é um isolante? Dê exemplos.

Ocorre troca térmica através do isolante? Como?

Quais as características que um isolante deve ter?