Fundamentos de Hidrostática e Calorimetria

Parte 2 - Calorimetria

1. Temperatura
2. Medição de Temperatura
3. Dilatação Térmica de Sólidos e Líquidos
4. Calorimetria
5. Propriedades Térmicas
6. Mecanismos de transferência de calor

Exercícios

Engenharias Civil / Elétrica / Mecânica
Prof. Renato Matroniani

Anhanguera

Temperatura

- Temperatura é uma das sete grandezas fundamentais do SI:

Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	Kg
Tempo	segundo	s
Corrente Elétrica	ampère	A
Temperatura	kelvin	K
Quantidade de Matéria	mol	mol
Intensidade Luminosa	candela	cd

- Os físicos medem a temperatura na escala Kelvin (K);
- Não existe limite superior, mas existe um limite inferior de temperatura;
- A temperatura ambiente está em torno de $290K$.

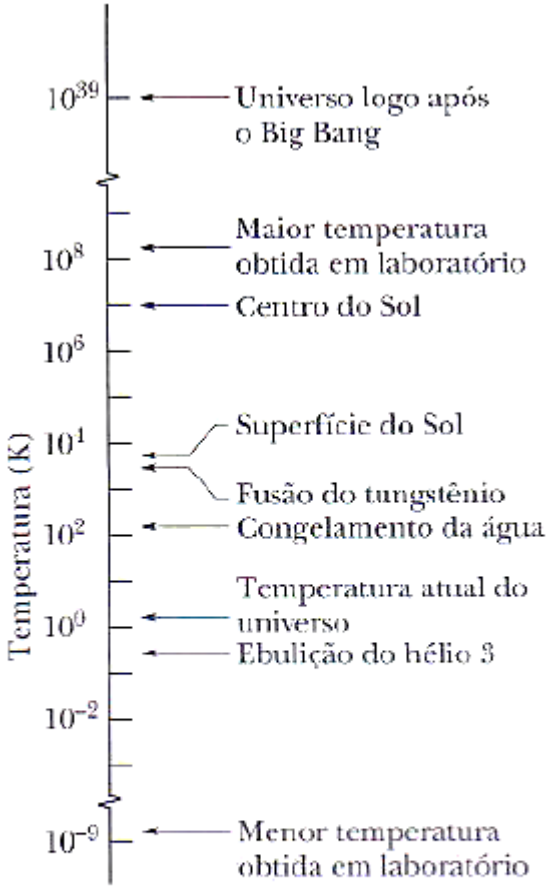


FIG. 18-1 Algumas temperaturas na escala Kelvin. A temperatura $T = 0$ corresponde a $10^{-\infty}$ e não pode ser plotada nesta escala logarítmica.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

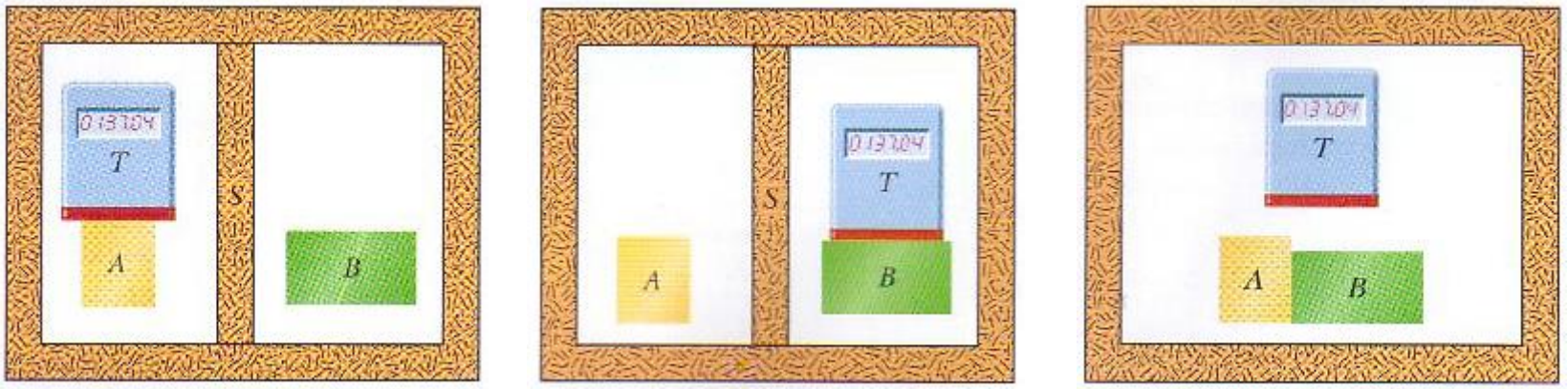
Temperatura

- Lei Zero da Termodinâmica:

"Se dois corpos A e B estão separadamente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo T, A e B estão em equilíbrio térmico entre si".

- Em outras palavras:

"Todo corpo possui uma propriedade chamada temperatura. Quando dois corpos estão em equilíbrio térmico, suas propriedades são iguais e vice-versa"



HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Medição de Temperatura

O ponto triplo da água

- Para criar uma escala de temperatura, deve-se escolher um fenômeno térmico reprodutível. O fenômeno escolhido é o ponto triplo da água;
- A água, o gelo e o vapor de água podem coexistir, em equilíbrio térmico, para apenas um conjunto de valores de pressão e temperatura;
- Por acordo internacional, a temperatura do ponto triplo é:

$$T_3 = 273{,}16K$$

- Esse ponto está a $273{,}1K$ do zero absoluto;

Medição de Temperatura

Termômetro de Gás a Volume Constante

- É o termômetro padrão, em relação ao qual todos os outros são calibrados. Ele se baseia na pressão de um gás em um volume fixo;

- O valor de T pode ser obtido da seguinte forma:

$$T = 273{,}16\frac{p}{p_3}$$

- Para medir o ponto de ebulição da água, por exemplo, o valor de T é obtido da seguinte forma:

$$T = 273{,}16 \lim_{p_3 \to 0} \frac{p}{p_3}$$

- Onde o $p_3 \to 0$ significa que estamos colocando quantidades cada vez menores de gás no bulbo, e quando isso acontece, a temperatura medida converge para a temperatura de gás ideal.

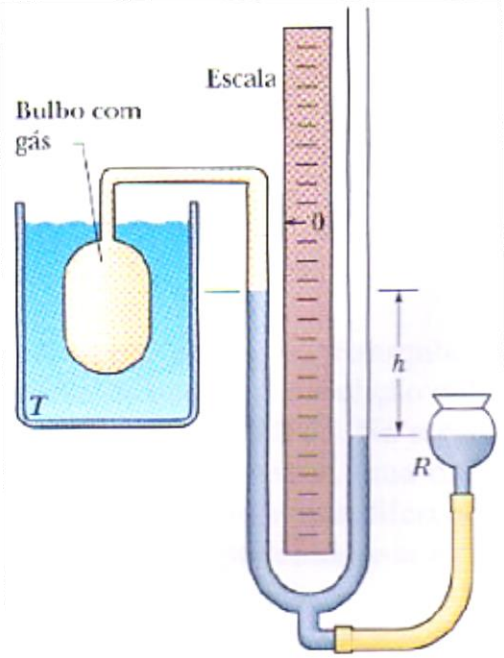
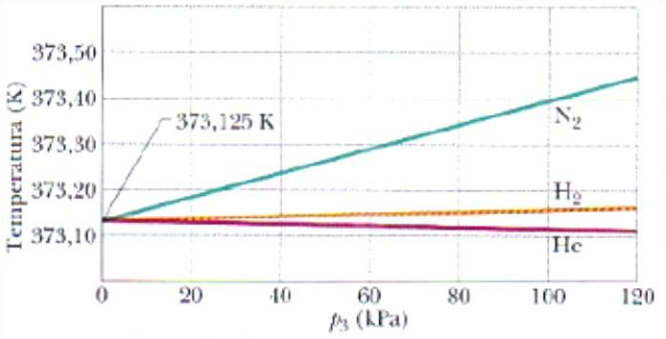


FIG. 18-5 Um termômetro de gás a volume constante, com o bulbo imerso em um líquido cuja temperatura T se pretende medir.



HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Medição de Temperatura

Termômetro de Gás a Volume Constante - Exercício

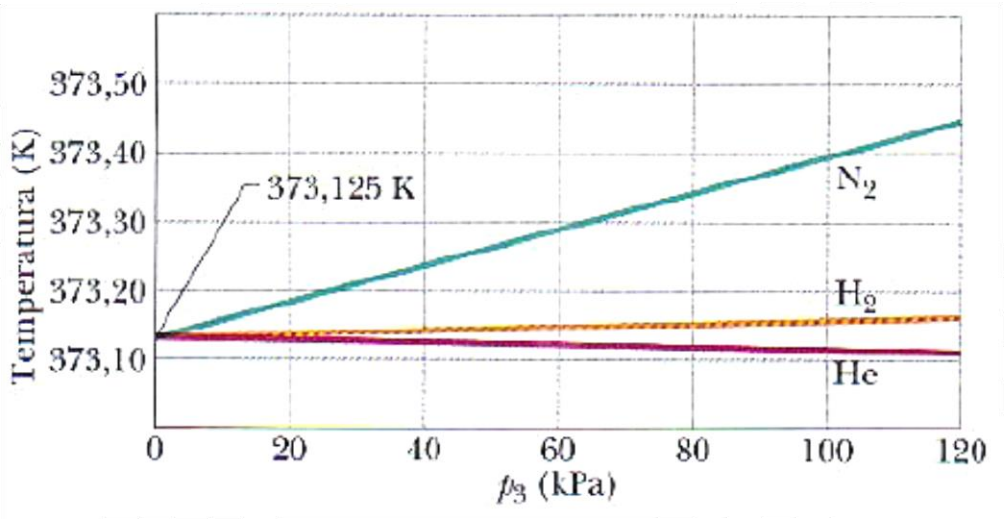
1. (Halliday et al, 2009, ex. 2, pág 207) Dois termômetros de gás a volume constante são construídos, um com nitrogênio e outro com hidrogênio. Ambos contém gás suficiente para que $p_3 = 80kPa$. Calcule:

a) A diferença de pressão entre os dois termômetros se os dois bulbos estão imersos em água fervente;

b) Qual dos dois gases está a uma pressão mais alta?

(utilize o gráfico a seguir para resolver o problema)

R: a) $0{,}06\ kPa$ b) N_2



HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Medição de Temperatura

Escalas de Temperatura

- A escala K é utilizada principalmente por cientistas;
- A escala Celsius e a Fahrenheit (mais comum nos EUA) são as escalas usadas no dia-a-dia;
- Se chamarmos de C a temperatura em graus Celsius, K a temperatura em Kelvin e F a temperatura em graus Fahrenheit, podemos relacionar as escalas da seguinte forma:

$$C = K - 273{,}15$$

$$F = \frac{9}{5}C + 32$$

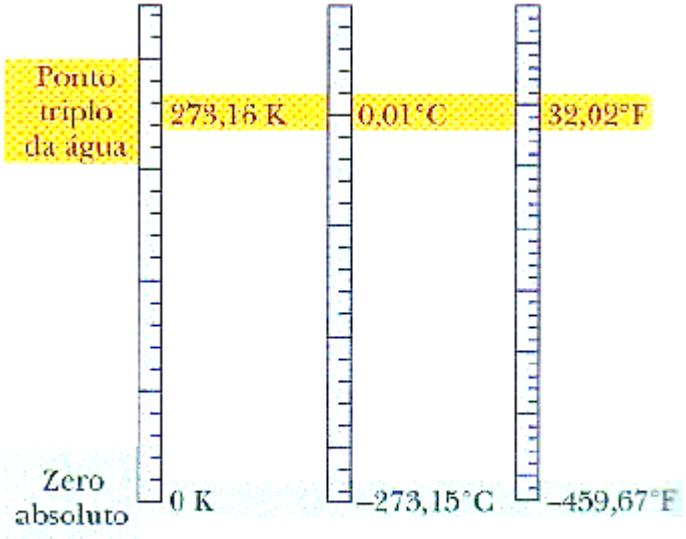


FIG. 18-7 Comparação entre as escalas Kelvin, Celsius e Fahrenheit de temperatura.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Medição de Temperatura

Escalas de Temperatura - Exercícios

2) Converta as temperaturas a seguir para ºF:

a) 100ºC (ponto de ebulição da água)

b) 37ºC (temperatura normal do corpo)

c) 20ºC (temperatura confortável)

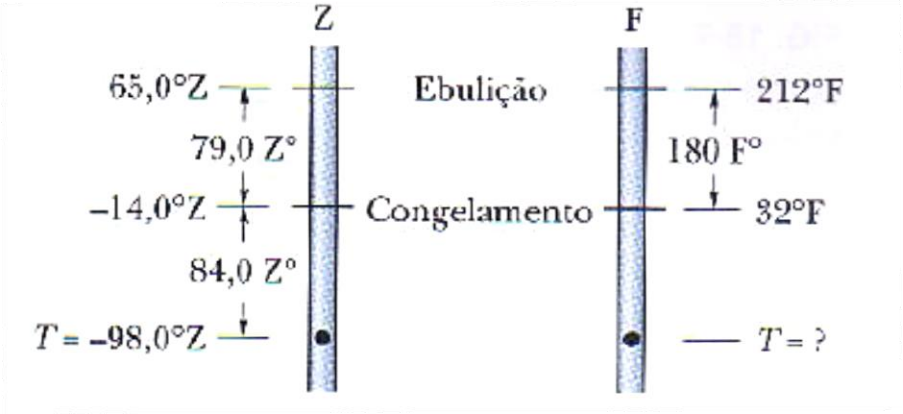
d) 0ºC (ponto de congelamento da água)

e) -18ºC

f) -40ºC

3) (Halliday et al, 2009, ex. 18-1, pág 187) Suponha que você encontre anotações antigas que descrevem uma escala de temperatura Z, no qual o ponto de ebulição da água é 65,0 ºZ e o ponto de congelamento é -14,0ºZ. A que temperatura na escala Fahrenheit corresponde uma temperatura de -98,0ºZ? (suponha escala Z linear).

R: $-159{,}39°F$



HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Escalas de Temperatura - Exercícios

4. Em 1964, a temperatura da aldeia de Oymyakon, na Sibéria, chegou a -71 °C.

a) Qual é o valor desta temperatura na escala Fahrenheit?

b) A maior temperatura registrada oficialmente nos Estados Unidos foi 134 °F, no vale da Morte, Califórnia. Qual é o valor desta temperatura na escala Celsius?

R: a) -96ºF, b) 56,7 ºC

5. Em que temperatura a leitura na escala Fahrenheit é igual

a) a duas vezes a leitura na escala Celsius?

b) e a metade da leitura na escala Celcius?

R: a) 320 ºF, b) -12,3 ºF

6. Em uma escala linear de temperatura X, a água congela a -125,0 °X e evapora a 375,0ºX. Em uma escala linear de temperatura Y, a água congela a -70,00 °Y e evapora a -30,00 °Y. Uma temperatura de 50,00 °Y corresponde a que temperatura na escala X?

R: 1375 ºX

7. Em uma escala linear de temperatura X, a água evapora a -53,5 °X e congela a -170 °X. Quanto vale a temperatura de 340 K na escala X? (Aproxime o ponto de ebulição da água para 373 K)

R: -92,1ºX

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Dilatação Térmica

- A dilatação térmica dos materiais deve sempre ser levada em consideração em muitas situações do dia-a-dia;
- Juntas de dilatação: uma ponte é dividida em trechos separados para evitar que se deforme quando o concreto se expande nos dias quentes;

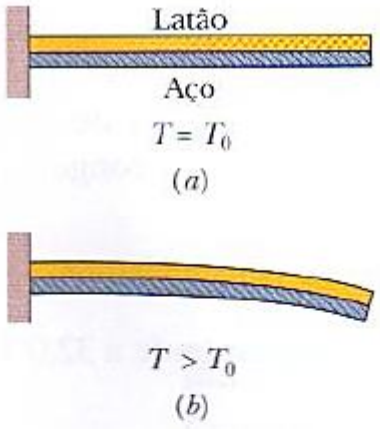


FIG. 18-10 (*a*) Uma tira bimetálica, formada por uma tira de latão e uma tira de aço soldadas entre si, à temperatura T_0. (*b*) A tira se enverga da forma mostrada para temperaturas maiores que esta temperatura de referência. Abaixo da temperatura de referência a tira se enverga no sentido oposto. Muitos termostatos funcionam com base neste princípio, fazendo e desfazendo um contato elétrico de acordo com a temperatura.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Dilatação Linear

- Se temperatura de uma barra metálica de comprimento L aumenta de um valor ΔT, seu comprimento aumenta de um valor ΔL dado por:

$$\Delta L = L\alpha\Delta T$$

- Onde α é o coeficiente de dilatação linear (unidade $°C^{-1}$ ou K^{-1});

Alguns Coeficientes de Dilatação Linear[a]

Substância	$\alpha\ (10^{-6}/C°)$	Substância	$\alpha\ (10^{-6}/C°)$
Gelo (a 0°C)	51	Aço	11
Chumbo	29	Vidro (comum)	9
Alumínio	23	Vidro (Pyrex)	3,2
Latão	19	Diamante	1,2
Cobre	17	Invar[b]	0,7
Concreto	12	Quartzo fundido	0,5

[a]Valores à temperatura ambiente, exceto no caso do gelo.

[b]Esta liga foi projetada para ter um baixo coeficiente de dilatação. O nome é uma abreviação de "invariável".

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Dilatação Volumétrica

- Se todas as dimensões de um sólido aumentam com a temperatura, obviamente a temperatura do sólido aumenta;
- No caso dos líquidos, somente a dilatação volumétrica é que faz sentido;
- Sendo V o volume de um sólido ou de um líquido que sofre um aumento de temperatura ΔT, o aumento de volume correspondente é dado por:

$$\Delta V = V\beta\Delta T,$$

- onde β é o coeficiente de dilatação volumétrica de um sólido ou líquido, que se relaciona com o coeficiente de dilatação linear da seguinte forma:

$$\beta = 3\alpha$$

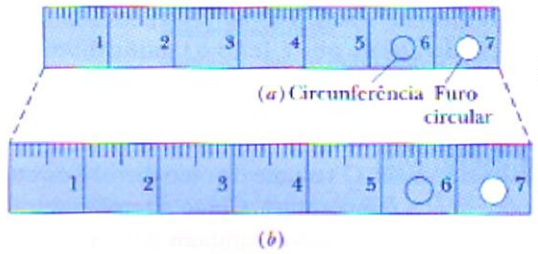


FIG. 18-11 A mesma régua de aço em duas temperaturas diferentes. Quando a régua se dilata, a escala, os números, a espessura e os diâmetros da circunferência e do furo circular aumentam do mesmo fator. (A dilatação foi exagerada para tornar o desenho mais claro.)

Coeficiente de dilatação volumétrica.

Substância	T(°C)	Coef. de dil. Vol. (^{0}C-1)
aço	0 - 100	31,4 x 10^{-6}
água	20	210 x 10^{-6}
álcool	0 - 60	1100 x 10^{-6}
alumínio	20 - 100	71,4 x 10^{-6}
cobre	25 - 100	50,4 x 10^{-6}
ferro	18 - 100	34,2 x 10^{-6}
gelo	20 - 0	153 x 10^{-6}
invar (Fe, Ni)	20	2,7 x 10^{-6}
madeira	20	90 x 10^{-6}
mercúrio	0 - 100	182 x 10^{-6}
ouro	15 - 100	42,9 x 10^{-6}
prata	15 - 100	56,7 x 10^{-6}
superinvar (Fe, Ni, Cr)	20	0,09 x 10^{-6}
tungstênio	20	12 x 10^{-6}
vidro comum	0 - 100	27 x 10^{-6}
vidro pirex	20 - 100	9,6 x 10^{-6}

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2. / tabela: www.if.usp.br

Dilatação Volumétrica

- **Coeficiente de dilatação volumétrica aparente de um líquido**

Quando um recipiente está totalmente preenchido por um determinado líquido e este conjunto é aquecido, ocorre derramamento do líquido. Esse fenômeno ocorre pois o líquido se dilata mais que o sólido (recipiente). À quantidade transborda chamamos de dilatação aparente do líquido e β_{ap} é o coeficiente de dilatação volumétrica aparente de um líquido:

$$\Delta V_{ap} = V \beta_{ap} \Delta T$$

- **Comportamento anômalo da água:**

T > 4 °C: a água se dilata quando a temperatura aumenta;

0 °C < T < 4 °C; a água se contrai quando a temperatura aumenta.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Dilatação Térmica – Exercícios

8. Um mastro de alumínio tem 33 m de altura. De quanto seu comprimento aumenta quando a temperatura aumenta 15 °C?

R: 1,1cm

9. Uma barra feita de uma liga de alumínio tem um comprimento de 10,000 cm a 20,000 °C e um comprimento de 10,015 cm no ponto de ebulição da água. (a) Qual é o comprimento da barra no ponto de congelamento da água? (b) Qual é a temperatura para a qual o comprimento da barra é 10,009 cm?

R: (a) 9,996cm, (b) 68 °C

10. Um prédio de 100 m, com uma estrutura de aço, tem um vão de 10 cm previsto pelo engenheiro. Que variação de temperatura esse vão permite sem risco para o prédio?

R: 95 °C

11. Um recipiente tem capacidade de 3000 cm^3 a 20 °C e está completamente cheio de um determinado líquido. Ao aquecer o conjunto até 120 °C, transbordam 27 cm^3. Qual o coeficiente de dilatação volumétrica aparente desse líquido, em relação ao material de que é feito o recipiente, em $°C^{-1}$?

R: $9{,}0x10^{-5}$

12. Em um dia quente em Las Vegas um caminhão-tanque foi carregado com 37000 L de óleo diesel. Ele encontrou tempo frio ao chegar a Payson, Utah, onde a temperatura estava 23,0 K abaixo da temperatura de Las Vegas, e onde ele entregou a carga. Quantos litros foram descarregados? O coeficiente de dilatação volumétrica do óleo diesel é 9,50 X $10^{-4}/C°$, e o coeficiente de dilatação linear do aço de que é feito o tanque do caminhão é 11 X $10^{-6}/\ C°$.

R: 36190 L

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Dilatação Térmica – Exercícios

13. Determine a variação de volume de uma esfera de alumínio com um raio inicial de 10 cm quando a esfera é aquecida de 0,0 °C para 100 °C.

R: 29 cm^3

14. Um furo circular em uma placa de alumínio tem 2,725 cm de diâmetro a 0,000 °C. Qual é o diâmetro do furo quando a temperatura da placa é aumentada para 100,0 °C?

R: 2,731 cm

15. Qual é o volume de uma bola de chumbo a 30,00 °C se o volume da bola é 50,00 cm^3 a 60,00 °C?

R: 49,87 cm^3

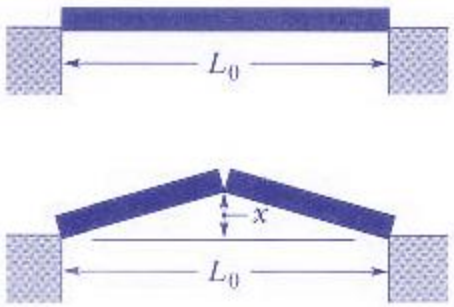
16. Uma xícara de alumínio com um volume de 100 cm^3 está cheia de glicerina a 22 °C. Que volume de glicerina é derramado se a temperatura da glicerina e da xícara aumenta para 28 °C? (O coeficiente de dilatação volumétrica da glicerina é 5,1 X $10^{-4}/\,C°$.)

R: 0,26 cm^3

17. A 20 °C, uma barra tem exatamente 20,05 cm de comprimento, de acordo com uma régua de aço. Quando a barra e a régua são colocadas em um forno a 270 °C, a barra passa a medir 20,11 cm de acordo coma a mesma régua. Qual é o coeficiente de expansão linear do material de que é feita a barra?

R: 23 x 10^{-6} $°C^{-1}$

18. Como resultado de um aumento de temperatura de 32 °C uma barra com uma rachadura no centro dobra para cima, como na figura a seguir. Se a distância fixa L_0 é 3,77 m e o coeficiente de dilatação linear da barra é 25 x $10^{-6}/\,C°$, determine a altura *X* do centro da barra.



R: 0,0754m

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Temperatura e Calor

Calor é a energia trocada entre um sistema e o ambiente devido a uma diferença de temperatura.

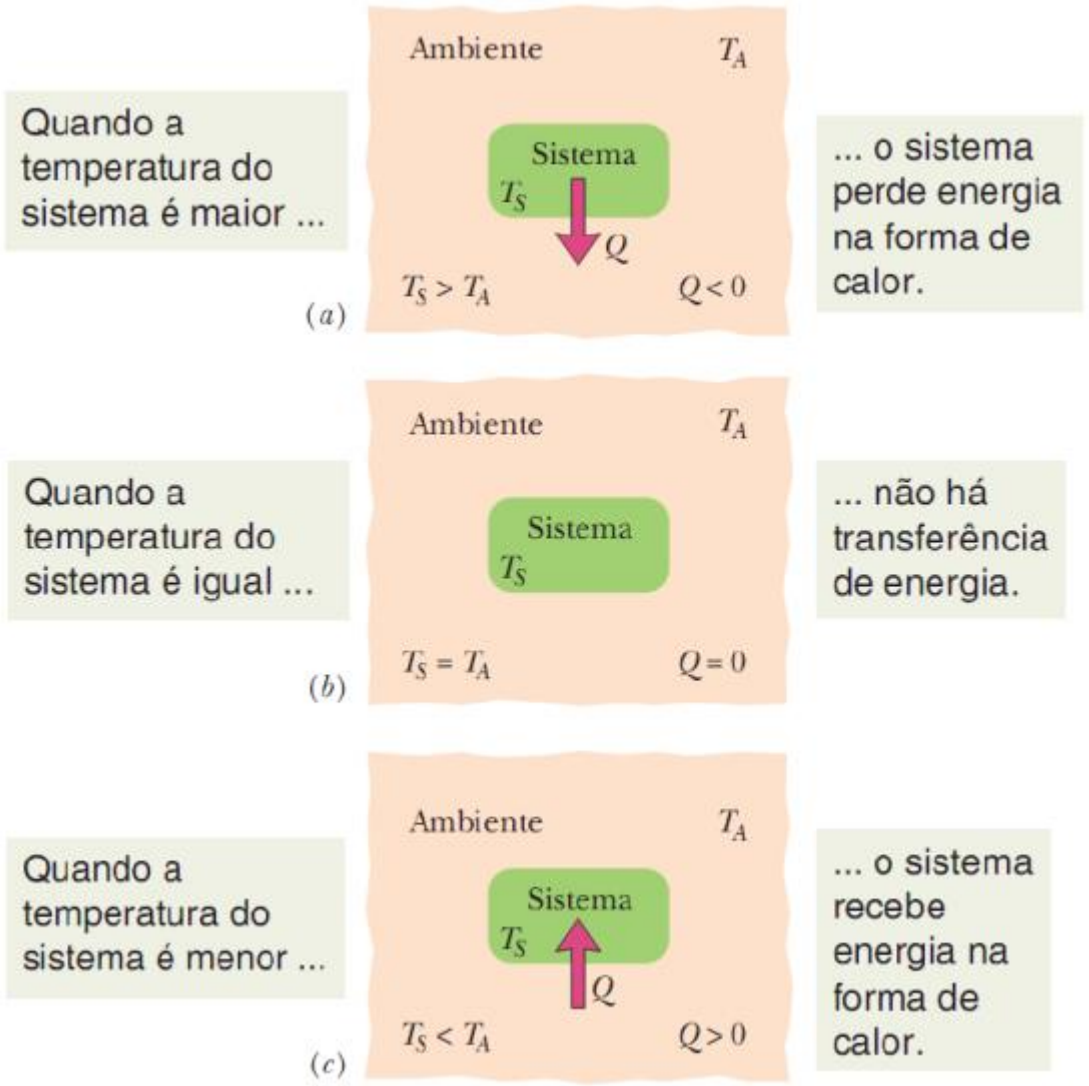


Figura 18-12 Se a temperatura de um sistema é maior que a temperatura ambiente, como em (*a*), uma certa quantidade Q de calor é perdida pelo sistema para o ambiente para que o equilíbrio térmico (*b*) seja restabelecido. (*c*) Se a temperatura do sistema é menor que a temperatura ambiente, uma certa quantidade de calor é absorvida pelo sistema para que o equilíbrio térmico seja restabelecido.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Temperatura e Calor: Unidades

- A **caloria (cal)** é definida como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1g de água de 14,5 °C para 15,5 °C.
- No sistema inglês, a unidade de calor é a **British thermal unit (Btu)**, definida como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1 libra de água de 63 °F para 64 °F.
- A unidade de calor do SI é o **joule (J)**.

A Absorção de Calor por Sólidos e Líquidos

- A **Capacidade térmica *C*** de um objeto é a constante de proporcionalidade entre o calor Q recebido ou cedido pelo objeto e a variação de temperatura ΔT do objeto, ou seja,

$$Q = C\,\Delta T = C(T_f - T_i)$$

sendo que T_i e T_f são as temperaturas iniciais e final do objeto.

- A unidade de capacidade térmica do SI é o joule por kelvin (J/K).

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

A absorção de calor por Sólidos e Líquidos: Calor Específico

O calor específico ***c*** é definido como a “capacidade térmica por unidade de massa” e se refere, não a um objeto, mas a uma massa unitária do material de que é feito o objeto. Em termos do calor específico, podemos escrever:

$$Q = cm\,\Delta T = cm(T_f - T_i)$$

A unidade de calor específico do SI é o joule por quilograma-kelvin (J/kg·K).

Quando a quantidade de uma substância é expressa em mols, o calor específico é expresso na forma de uma quantidade de calor por mol e recebe o nome de **calor específico molar.**

Tabela 18-3

Alguns Calores Específicos e Calores Específicos Molares à Temperatura Ambiente

Substância	Calor Específico $\frac{cal}{g \cdot K}$	Calor Específico $\frac{J}{kg \cdot K}$	Calor Específico Molar $\frac{J}{mol \cdot K}$
Sólidos Elementares			
Chumbo	0,0305	128	26,5
Tungstênio	0,0321	134	24,8
Prata	0,0564	236	25,5
Cobre	0,0923	386	24,5
Alumínio	0,215	900	24,4
Outros Sólidos			
Latão	0,092	380	
Granito	0,19	790	
Vidro	0,20	840	
Gelo (−10°C)	0,530	2220	
Líquidos			
Mercúrio	0,033	140	
Etanol	0,58	2430	
Água do mar	0,93	3900	
Água doce	1,00	4187	

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Absorção de Calor por Sólidos e Líquidos: Calor de Transformação

A quantidade de energia por unidade de massa que deve ser transferia na forma de calor para que uma amostra mude totalmente de fase é chamada de **calor de transformação** e representada pela letra ***L***.

Quando uma amostra de massa m sofre uma transformação de fase completa, a energia transferida é dada pela equação

$$Q = Lm$$

Quando a mudança é da fase líquida para a fase gasosa, o calor de transformação é chamado de **calor de vaporização** e representado pelo símbolo L_V.

Quando a mudança é da fase sólida para a fase líquida, o calor de transformação é chamado de **calor de fusão** e representado pelo símbolo L_F.

Tabela 18-4

Alguns Calores de Transformação

	Fusão		Ebulição	
Substância	Ponto de Fusão (K)	Calor de Fusão L_F (kJ/kg)	Ponto de Ebulição (K)	Calor de Vaporização L_V (kJ/kg)
Hidrogênio	14,0	58,0	20,3	455
Oxigênio	54,8	13,9	90,2	213
Mercúrio	234	11,4	630	296
Água	273	333	373	2256
Chumbo	601	23,2	2017	858
Prata	1235	105	2323	2336
Cobre	1356	207	2868	4730

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Exercícios

19. Um lingote de cobre de massa $m_c = 75g$ é aquecido em um forno de laboratório até a temperatura T= 312 °C. em seguida, o lingote é colocado em um béquer de vidro contendo uma massa $m_a = 220g$ de água. A capacidade térmica C_b do béquer é 45 cal/K. A temperatura inicial da água e do béquer é $T_i = 12\,°C$. Supondo que o lingote, o béquer e a água são um sistema isolado e que a água não é vaporizada, determine a temperatura final T_f do sistema quando o equilíbrio térmico é atingido. R: 20°C

20. a) Que quantidade de calor deve absorver uma amostra de gelo de massa *m* = 720g a -10 °C para passar ao estado líquido a 15 °C? R: 15,98kJ
    b) Se fornecermos ao gelo uma energia total de apenas 210 kJ (na forma de calor), quais serão o estado e a temperatura da amostra? R: 580g de água e 140g de gelo

21. Um certo nutricionista aconselha as pessoas que querem perder peso de beber água gelada. Sua teoria é a de que o corpo deve queimar gordura suficiente para aumentar a temperatura da água de 0,00 °C. Quantos litros de água gelada uma pessoa precisa beber para queimar 454 g de gordura, supondo que para queimar esta quantidade de gordura 3500 Cal devem ser transferidas para a água? Por que não é recomendável seguir o conselho do nutricionista? (Um litro = $10^3\ cm^3$. A massa específica da água é $1{,}00\ g/cm^3$.) R: 94,6L

22. Que massa de água permanece no estado líquido depois que 50,2 kJ são transferidos na forma de calor a partir de 260 g de água inicialmente no ponto de congelamento? R: 109g

23. Calcule a menor quantidade de energia, em joules, necessária para fundir 130 g de prata inicialmente a 15,0 °C. R: 42,7J

24. Uma forma de evitar que os objetos que se encontram no interior de uma garagem congelem em uma noite fria de inverno, em que a temperatura cai abaixo do ponto de congelamento da água, é colocar uma banheira velha com água na garagem. Se a massa da água é 125 kg e a temperatura inicial é 20 °C, (a) que energia a água deve transferir para o ambiente para congelar totalmente e (b) qual é a menor temperatura possível da água e do ambiente até que isso aconteça? a) 52 MJ b) 0°C

25. Uma certa substância tem uma massa por mol de 50,0 g/mol. Quando 314 J são adicionados em forma de calor a uma amostra de 30,0 g, a temperatura da amostra sobe de 25,0 °C para 45 °C. Quais são (a) o calor específico e (b) o calor específico molar da substância? (c) Quantos mols estão presentes na amostra? R: a) 523 J/kg.K b) 26,2 J/mol.K c) 0,6 mol

26. Que massa de vapor a 100 °C deve ser misturada com 150 g de gelo no ponto de fusão, em um recipiente isolado termicamente, para produzir água a 50 °C? R: 33g

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Mecanismos de Transferência de Calor: Condução

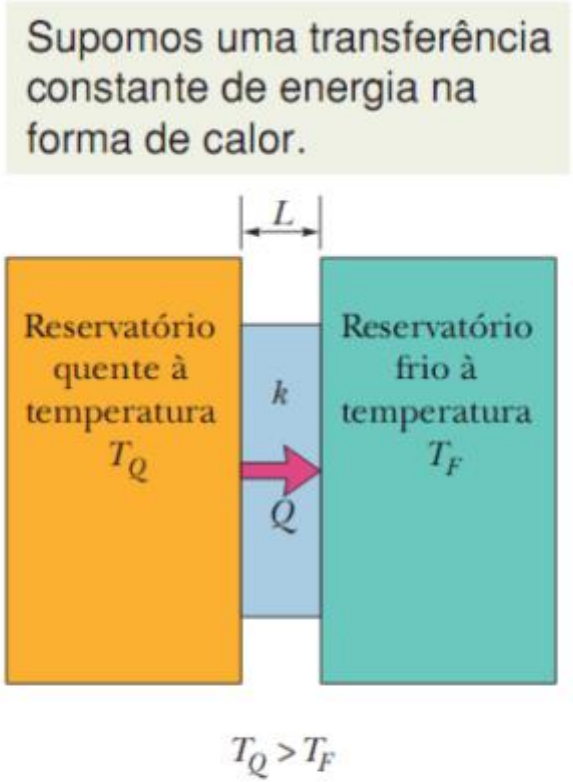


Figura 18-18 Condução de calor. A energia é transferida na forma de calor de um reservatório à temperatura T_Q para um reservatório mais frio à temperatura T_F através de uma placa de espessura L e condutividade térmica k.

Considere uma placa de área *A* e espessura *L* cujas faces são mantidas a temperaturas T_Q e T_F por uma fonte quente e uma fonte fria. Seja Q a energia transferida na forma de calor através da placa em um intervalo de tempo *t*. Nesse caso, a taxa de condução P_{cond} (energia transferida por unidade de tempo) é dada por

$$P_{\text{cond}} = \frac{Q}{t} = kA\,\frac{T_H - T_C}{L}$$

onde k, a condutividade térmica, é uma constante que depende do material de que é feita a placa.

A resistência térmica R (ou valor de R) de uma placa de espessura L é definida através da equação

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

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Mecanismos de Transferência de Calor: Condução

Tabela 18-6

Algumas Condutividades Térmicas

Substância	k (W/m · K)
Metais	
Aço inoxidável	14
Chumbo	35
Ferro	67
Latão	109
Alumínio	235
Cobre	401
Prata	428
Gases	
Ar (seco)	0,026
Hélio	0,15
Hidrogênio	0,18
Materiais de Construção	
Espuma de poliuretano	0,024
Lã de pedra	0,043
Fibra de vidro	0,048
Pinho	0,11
Vidro de janela	1,0

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Mecanismos de Transferência de Calor: Condução

Se T_X é a temperatura de interface entre dois materiais, temos

$$P_{\text{cond}} = \frac{k_2 A(T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A(T_X - T_C)}{L_1}.$$

$$T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1}.$$

$$P_{\text{cond}} = \frac{A(T_H - T_C)}{L_1/k_1 + L_2/k_2}$$

No caso de *n* materiais,

$$P_{\text{cond}} = \frac{A(T_H - T_C)}{\Sigma\,(L/k)}$$

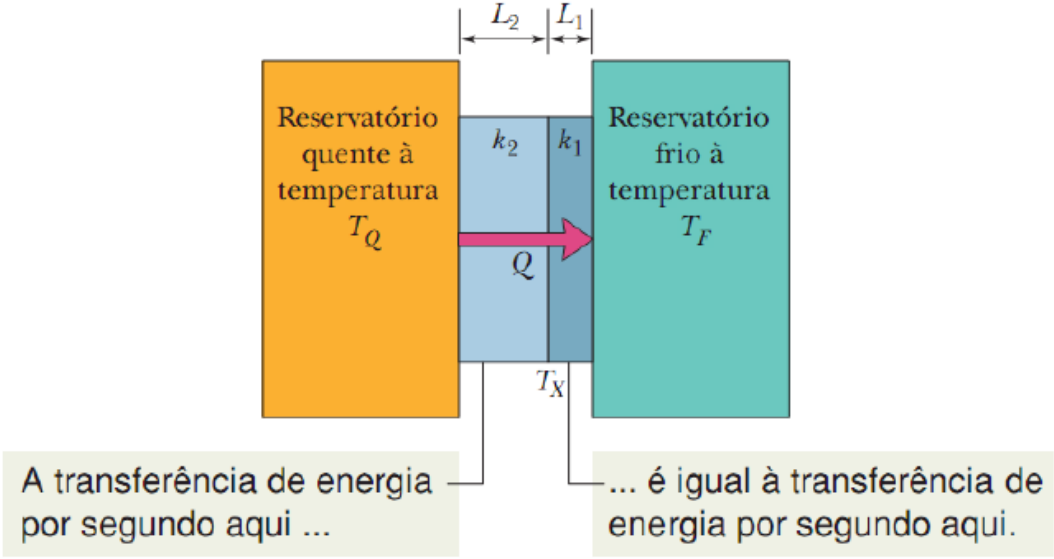
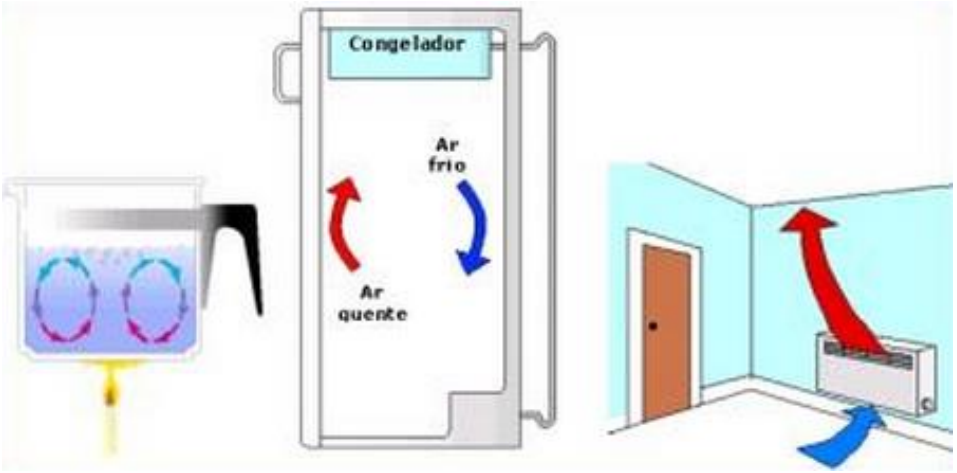


Figura 18-19 O calor é transferido a uma taxa constante através de uma placa composta feita de dois materiais diferentes com diferentes espessuras e diferentes condutividades térmicas. A temperatura da interface dos dois materiais no regime estacionário é T_X.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Mecanismos de Transferência de Calor: Convecção

- Na convecção, a transferência de energia ocorre quando um fluido entra em contato com um objeto de maior temperatura que o fluido;
- A temperatura da parte do fluido que está contato com o objeto aumenta e parte deste fluido se expande, e portanto, fica menos densa;
- Como o fluido mais quente (menos denso) é mais leve que o fluido mais denso, que está frio, a força de empuxo o faz subir;
- O fluido mais frio escoa para tomar lugar do fluido mais quente, em um processo que pode continuar indefinidamente.



HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2. Imagem: http://rogeriofisica.files.wordpress.com/2010/03/corrente_conveccao.jpg, acesso em 04/11/2013,

Mecanismos de Transferência de Calor: Radiação

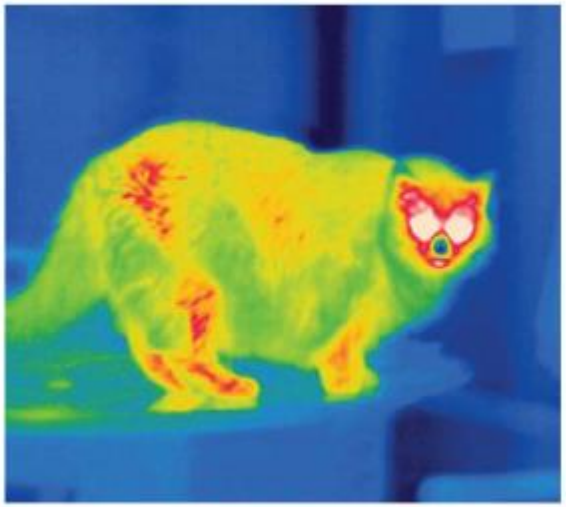


Figura 18-20 Um termograma em cores falsas mostra a taxa com a qual a energia é irradiada por um gato. O branco e o vermelho correspondem às maiores taxas; o azul (nariz) às menores. *(Edward Kinsman/Photo Researchers)*

Na radiação, um objeto e o ambiente trocam energia através de ondas eletromagnéticas.

A taxa P_{rad} com a qual um objeto emite energia através da radiação eletromagnética depende da área *A* da superfície do objeto e da temperatura *T* dessa área em K e é dada por

$$P_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A T^4$$

Onde $\sigma = 5{,}6704\ X\ 10^{-8}\ W/m^2K^4$ é a chamada **constante de Stefan-Boltzmann** e ε é a **emissividade**.

A taxa líquida P_{liq} de troca de energia com o ambiente por radiação térmica é dada por:

$$P_{\text{líq}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A (T^4_{\text{amb}} - T^4)$$

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Exercícios

27. A figura a seguir (18-22) mostra a seção reta de uma parede feita com uma camada interna de madeira, de espessura L_a, uma camada externa de tijolos, de espessura L_d $(= 2{,}0L_a)$ e duas camadas intermediárias de espessura e composição desconhecidas. A condutividade térmica da madeira é k_a e a dos tijolos é k_d $(= 5{,}0\ k_a)$. A área *A* da parede também é desconhecida. A condução térmica através da parede atingiu o regime estacionário; as únicas temperaturas conhecidas são $T_1 = 25\ °C, T_2 = 20\ °C$ *e* $T_5 = -10\ °C$. Qual é a temperatura T_4? R: -8,0°C

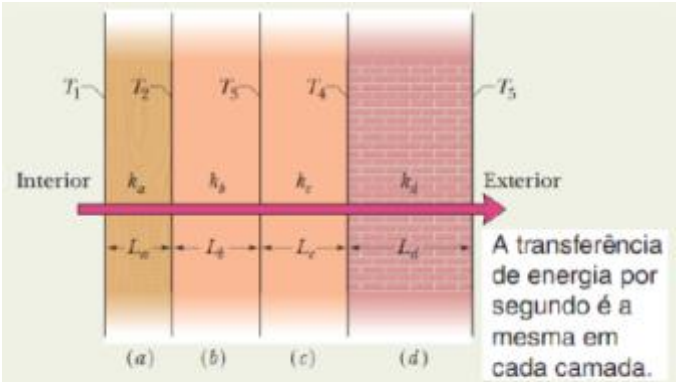
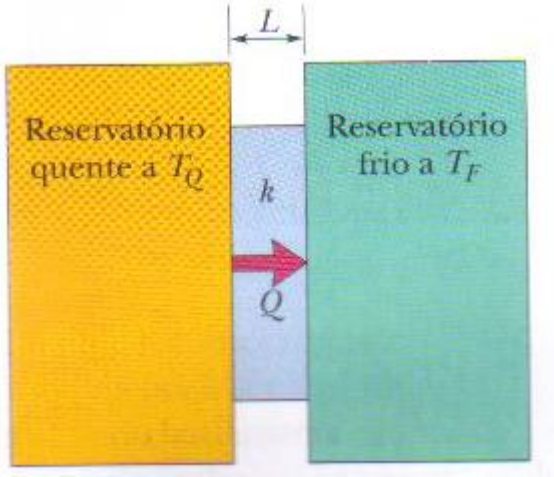


Figura 18-22 Uma parede de quatro camadas através da qual existe transferência de calor.

28. Considere a placa da figura a seguir. Suponha que L = 25,0 cm, A = 90,0 cm^2 e que o material é cobre. Se $T_Q = 125\ °C, T_F = 10{,}0\ °C$ e um regime estacionário é atingido, determine a taxa de condução de calor através da placa. R: 1,66 kJ/s



HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.

Exercícios

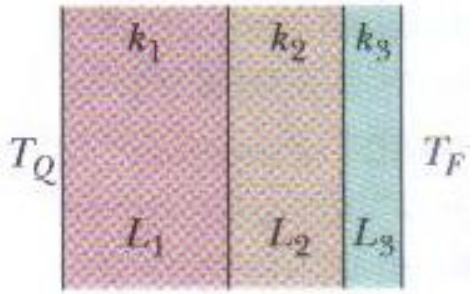
29. Uma barra cilíndrica de cobre de 1,2 m de comprimento e $4{,}8\ cm^2$ de seção reta é bem isolada e não perde energia através da superfície. A diferença de temperatura entre as extremidades é 100 °C, já que uma está imersa em uma mistura de água e gelo e a outra em uma mistura de água e vapor. (a) Com que taxa a energia é conduzida pela barra? (b) Com que taxa o gelo derrete na extremidade fria? R: a) 16 J/s b) 0,048 g/s

30. O teto de uma casa em uma cidade de clima frio deve ter uma resistência térmica R de $30\ m^2 \cdot K/W$. Para isso, qual deve ser a espessura de um revestimento (a) de espuma de poliuretano e (b) de prata? R: a) 0,72m b) 12,84 km

31. Uma esfera com 0,500 m de raio, cuja emissividade é 0,850, está a 27,0 °C em um local onde a temperatura ambiente é 77,0 °C. Com que taxa a esfera (a) emite e (b) absorve radiação térmica? (c) Qual é a taxa líquida de troca de energia da esfera? R: 1,23 kW

32. A figura a seguir mostra uma parede feita de três camadas de espessuras $L_1, L_2 = 0{,}700\ L_1\ e\ L_3 = 0{,}350\ L_1$. As condutividades térmicas são $k_1, k_2 = 0{,}900\ k_1\ e\ k_3 = 0{,}800\ k_1$. As temperaturas do lado esquerdo e do lado direito da parede são $T_Q = 30{,}0\ °C\ e\ T_F = -15{,}0\ °C$, respectivamente. O sistema está no regime estacionário. (a) Qual é a diferença de temperatura ΔT_2 na camada 2 (entre o lado esquerdo e o lado direito da camada)? Se o valor de k_2 fosse $1{,}10k_1$, (b) a taxa de condução de energia através da parede seria maior, menor ou igual à anterior, e (c) qual seria o valor de ΔT_2?

R: a) 15,8°C b) aumenta c) 13,8°C



HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física** : gravitação, ondas e temodinâmica. 8ª ed. São Paulo: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009, v.2.