PARTE I

Unidade A

Introdução à Termologia

Capítulo 1 Conceitos fundamentais, *14*

Unidade B

A temperatura e seus efeitos

Capítulo 2 Termometria, *22*

Capítulo 3 Dilatação térmica de sólidos e líquidos, *41*

Unidade C

A energia térmica em trânsito

Capítulo 4 Calor: energia térmica em trânsito, *63*

Capítulo 5 Mudanças de fase, *83*

Capítulo 6 Diagramas de fases, *99*

Capítulo 7 Propagação do calor, *124*

Unidade D

Estudo dos gases e Termodinâmica

Capítulo 8 Estudo dos gases, *147*

Capítulo 9 As leis da Termodinâmica, *171*

PARTE I

Capítulo 1

Conceitos fundamentais

Controlar as variações de temperatura no ambiente em que vive é uma preocupação constante dos seres humanos desde os primórdios da humanidade. Aquecer-se, conservar alimentos e movimentar máquinas são exemplos de situações nas quais se pode notar a importância dos fenômenos térmicos.

1.1 Termologia: observações macroscópicas, interpretações microscópicas

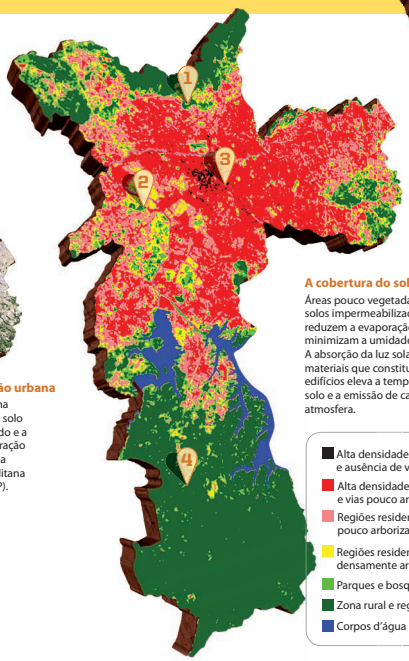
A análise de aspectos macroscópicos e microscópicos propicia uma compreensão mais profunda de um mesmo fenômeno.

Do ponto de vista microscópico, podemos considerar a temperatura de um corpo com a medida do grau de agitação de suas moléculas. De um modo geral, a matéria pode se apresentar na natureza em três estados de agregação: sólido, líquido ou gasoso. A energia térmica, quando em trânsito de um corpo para outro, recebe o nome de calor.

Ilhas urbanas de calor

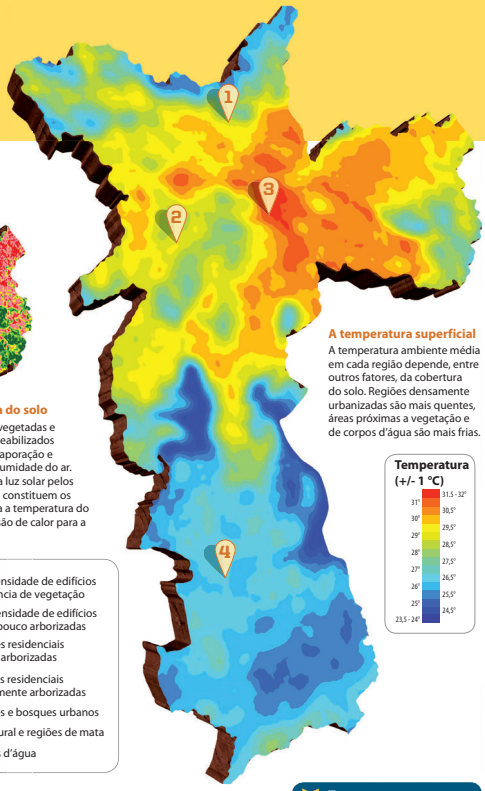
Em regiões urbanas ocorre um fenômeno denominado Ilha de calor que se caracteriza por apresentar temperaturas até 10 °C maiores do que nas regiões adjacentes. Esse fenômeno decorre da pouca vegetação, da impermeabilização do solo e da concentração de poluentes, entre outros fatores.

A concentração urbana
A grande mancha rosada mostra o solo impermeabilizado e a grande concentração de edificações na região metropolitana de São Paulo (SP).



A cobertura do solo
Áreas pouco vegetadas e solos impermeabilizados reduzem a evaporação e minimizam a umidade do ar. A absorção da luz solar pelos materiais que constituem os edifícios eleva a temperatura do solo e a emissão de calor para a atmosfera.

- Alta densidade de edifícios e ausência de vegetação
- Alta densidade de edifícios e vias pouco arborizadas
- Regiões residenciais pouco arborizadas
- Regiões residenciais densamente arborizadas
- Parques e bosques urbanos
- Zona rural e regiões de mata
- Corpos d'água



A temperatura superficial
A temperatura ambiente média em cada região depende, entre outros fatores, da cobertura do solo. Regiões densamente urbanizadas são mais quentes, áreas próximas a vegetação e de corpos d'água são mais frias.

Temperatura (+/- 1 °C)
31° – 31,5 - 32°
30° – 30,5°
29° – 29,5°
28° – 28,5°
27° – 27,5°
26° – 26,5°
25° – 25,5°
23,5 - 24° – 24,5°

Diferenças regionais
Numa cidade com as dimensões de São Paulo, podemos observar diferentes microclimas, evidenciando grandes variações de temperatura ao longo da metrópole. A heterogeneidade climática pode ser justificada por fatores tão distintos quanto a alta urbanização (prédios e asfalto) e áreas de preservação ambiental, entre outros.

1
Horto Florestal
Grande cobertura vegetal, rodeada por região altamente urbanizada: temperaturas entre 28 °C e 29 °C.

2
USP
Poucos edifícios e vegetação abundante: temperaturas entre 26 °C e 28 °C.

3
Brás
Grande concentração urbana e vias pouco arborizadas: temperaturas entre 31 °C e 32 °C.

4
Parelheiros
Baixa urbanização e cobertura vegetal abundante, próxima aos reservatórios de água: temperaturas entre 24 °C e 25 °C.

Para pensar

1. Qual é a influência da vegetação e dos corpos d'água na temperatura ambiente?
2. Por que as regiões densamente urbanizadas têm temperaturas maiores que outras regiões?

Seção 1.1

Termologia: observações macroscópicas, interpretações microscópicas

Objetivos

- Estudar a Termologia, considerando os aspectos macroscópicos e microscópicos da matéria.
- Conceituar energia térmica, calor e temperatura.
- Enunciar a lei zero da Termodinâmica.
- Caracterizar os três estados de agregação da matéria.
- Conceituar fase de um sistema e fase de uma substância.

Termos e conceitos

- termologia
- estudo macroscópico
- estudo microscópico
- energia térmica
- calor
- temperatura
- estados de agregação

Na Termologia, ramo da Física com que iniciamos o segundo volume, estudamos os fenômenos ligados à energia térmica (fenômenos térmicos). Esses fenômenos, assim como outros fenômenos físicos, podem ser interpretados sob duas perspectivas que frequentemente se completam: a macroscópica e a microscópica.

O estudo macroscópico está relacionado com os aspectos globais do sistema, como o volume que ocupa, sua temperatura e outras propriedades que podemos perceber por nossos sentidos. Ao estudar a Mecânica, no primeiro volume, geralmente adotamos o ponto de vista macroscópico, analisando apenas as propriedades do sistema na sua interação com o ambiente, como energia mecânica, posição, velocidade etc. Entretanto, muitas vezes, para uma compreensão mais aprofundada de um fenômeno, é importante adotar também o ponto de vista microscópico, considerando então grandezas que não percebemos pelos nossos sentidos e que são medidas indiretamente.

Nos fenômenos térmicos, microscopicamente, consideramos a energia das moléculas, suas velocidades, interações etc. Nessa análise, os resultados obtidos devem ser compatíveis com o estudo feito por meio de grandezas macroscópicas.

As perspectivas macroscópica e microscópica completam-se na Termologia, propiciando uma compreensão mais profunda de um mesmo fenômeno. Exemplificando, a noção de temperatura obtida a partir da sensação táctil de quente e frio (ponto de vista macroscópico) aprofunda-se ao considerarmos o movimento molecular e entendermos a temperatura a partir desse movimento (ponto de vista microscópico).

Esse entrelaçamento de perspectivas ocorre em vários outros ramos da Física, sendo característico do estudo atual dessa ciência.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Para nós, a fonte de calor mais importante é o Sol.

1 Energia térmica e calor

As moléculas constituintes da matéria estão sempre em movimento, denominado **agitação térmica**. A energia cinética associada a esse movimento é denominada **energia térmica**.

A energia térmica de um corpo pode variar. Por exemplo, se uma certa quantidade de água for colocada junto à chama de um bico de gás, o movimento de suas moléculas se torna mais intenso, isto é, sua energia térmica aumenta. Por outro lado, adicionando-se gelo à água, ocorre a diminuição do movimento molecular da água, isto é, sua energia térmica diminui. Essa ocorrência é ilustrada nas **figuras 1A e 1B**, nas quais as moléculas de água são representadas esquematicamente por pequenas esferas.

Nesses exemplos, identificamos um corpo quente (a chama do bico de gás) e um corpo frio (o gelo). Note que, ao empregar os termos "quente" e "frio", estamos utilizando uma noção subjetiva de temperatura, baseada em sensações apreendidas pelo tato. Embora seja uma forma imprecisa de caracterizar a temperatura, essa é a noção que utilizamos no dia a dia para dizer que um corpo quente está a uma temperatura mais elevada que um corpo frio.

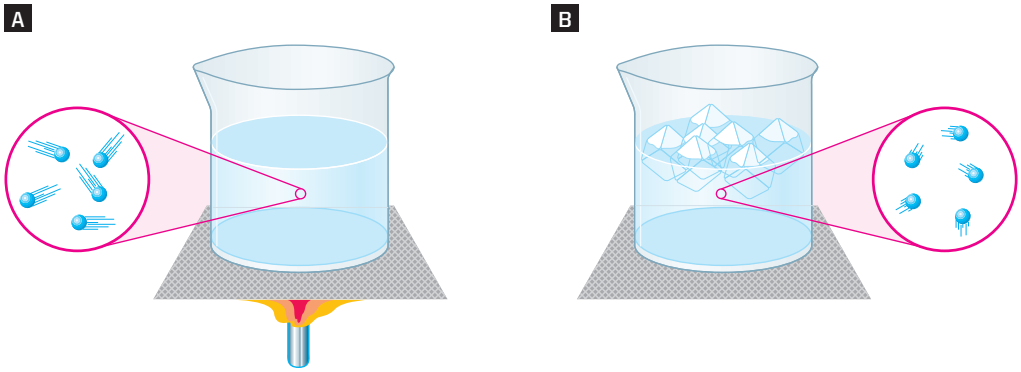


Figura 1. As moléculas da água quente se agitam mais intensamente.

Ainda pelos exemplos apresentados, podemos concluir que a energia térmica transferiu-se de um corpo para outro (do bico de gás para a água, na **figura 1A**, e da água para o gelo, na **figura 1B**), em virtude da **diferença de temperatura** entre eles. À energia térmica **em trânsito** damos o nome de **calor**. Por isso não se deve falar em calor "contido" num corpo. Quando for necessário dar a ideia da energia contida num corpo, relacionada com a agitação de suas moléculas, deve-se usar a expressão **energia térmica**.

O fato de que o calor é uma forma de energia só foi definitivamente estabelecido na Física no século XIX, graças aos trabalhos dos cientistas William Thompson (conde de Rumford), Joseph Mayer e James Prescott Joule. Nos modelos aceitos até então, o calor era entendido como uma substância imponderável (fluido calórico) que se incorporava aos corpos ou sistemas.

A medida da **quantidade de calor** trocada entre dois corpos é, portanto, uma medida de energia. Sendo assim, a unidade de quantidade de calor no Sistema Internacional é o **joule** (**J**). Entretanto, a **caloria** (símbolo **cal**), unidade estabelecida antes de se entender o calor como forma de energia, continua sendo utilizada para medir as quantidades de calor.

A relação entre a caloria (cal) e o joule (J) é:

$$1 \text{ cal} = 4{,}1868 \text{ J}$$

2 Noção de temperatura

Supondo não haver mudança de fase, quando o corpo recebe energia térmica, suas moléculas passam a se agitar mais intensamente – a temperatura aumenta. Ao perder energia, as moléculas do corpo se agitam com menor intensidade – a temperatura diminui. Na **figura 2**, as moléculas do gás, representadas esquematicamente por pequenas esferas, aumentam seu grau de agitação ao receberem energia térmica da chama do bico de gás.

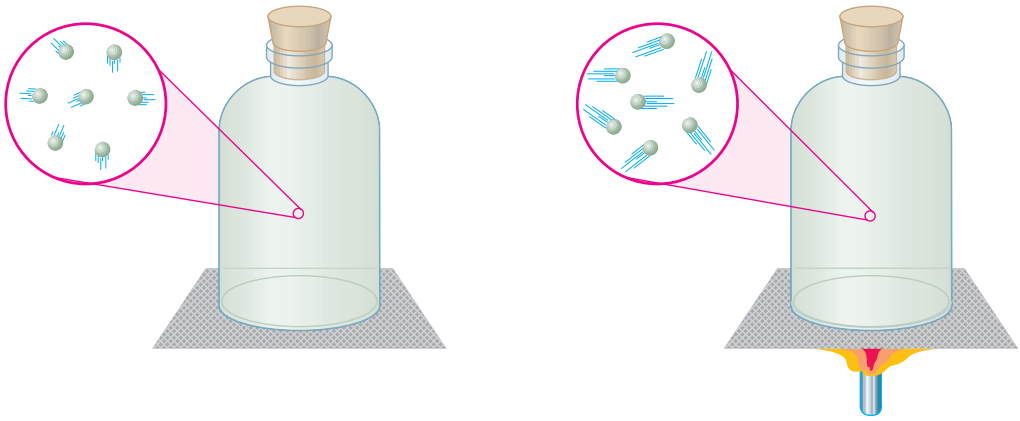


Figura 2. As moléculas do gás, quando colocado sobre a chama, adquirem mais energia cinética, ou seja, o gás passa a apresentar uma temperatura mais elevada.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

A transferência de calor entre dois corpos, como acentuamos anteriormente, pode ser explicada pela diferença entre suas temperaturas. Quando dois corpos são colocados em presença um do outro, as moléculas do corpo quente (mais rápidas) transferem energia cinética para as moléculas do corpo frio (mais lentas). Com isso, as moléculas do corpo frio aumentam sua velocidade e as moléculas do corpo quente têm sua velocidade diminuída, até ser alcançada uma situação de equilíbrio. Em outras palavras, há transferência de energia térmica (calor) do corpo mais quente para o corpo mais frio.

A situação final de equilíbrio, caracterizada pela **igualdade das temperaturas** dos corpos, constitui o **equilíbrio térmico**. Assim, dois corpos em equilíbrio térmico possuem obrigatoriamente temperaturas iguais. Uma vez alcançada essa situação, não mais há transferência de calor entre eles.

Sendo assim, podemos concluir que: "se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico entre si". Esse enunciado constitui a chamada **lei zero da Termodinâmica**. Assim, se um corpo A está em equilíbrio térmico com um corpo C e um corpo B também está em equilíbrio térmico com o corpo C, então os corpos A e B estão em equilíbrio térmico entre si.

3 Os estados de agregação da matéria

Estamos habituados com o fato de a água apresentar-se como líquido, sólido ou vapor, podendo passar de uma para outra situação. Assim, como se mostra na **figura 3**, um cubo de gelo (sólido) pode derreter, passando a líquido; e este, por aquecimento, pode passar a vapor.

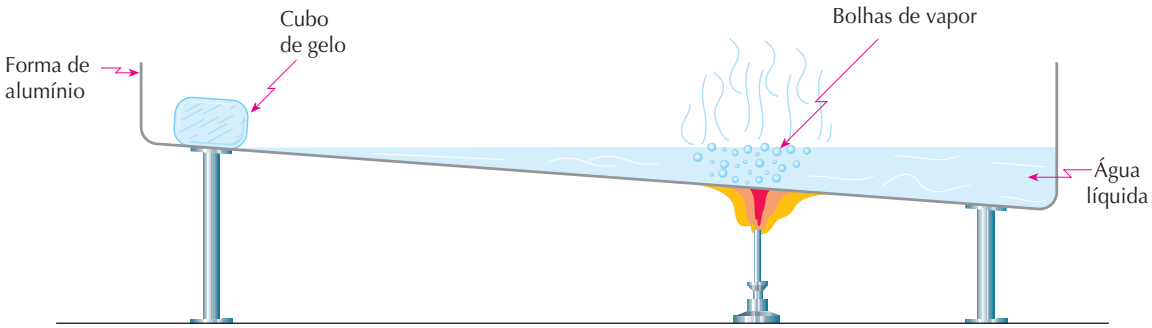


Figura 3. **Esquema de um dispositivo em que o gelo se transforma em água líquida, e esta, por aquecimento, se transforma em vapor.**

Sólido, **líquido** e **gasoso** constituem os **estados de agregação da matéria** (há uma diferença física entre gás e vapor que discutiremos em outro capítulo, mas ambos correspondem ao estado gasoso). De modo geral, os materiais que nos rodeiam se encontram em um desses estados de agregação.

Um sólido tem volume e forma definidos. Um líquido assume a forma do recipiente que o contém, mas seu volume é definido. Um gás ou um vapor preenche totalmente um recipiente fechado no qual seja colocado, qualquer que seja a forma deste. Portanto, gases e vapores não têm forma nem volume definidos: a forma e o volume são do recipiente no qual se encontram.

Para explicar esses estados de agregação, admite-se que qualquer material é formado de moléculas e que estas estão em movimento, mais intenso ou menos intenso, com maior ou menor liberdade, conforme a intensidade das forças de coesão* entre elas.

* Chamam-se **forças de coesão** as forças que se desenvolvem entre moléculas de mesma natureza, e **forças de adesão** as que se desenvolvem entre moléculas de naturezas diferentes.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

No **estado sólido**, as forças de coesão são muito intensas, restringindo o movimento das moléculas a uma ligeira vibração em torno de uma posição média. Na **figura 4**, que representa esquematicamente as moléculas, esse movimento restrito é mostrado em **A** (no destaque). Por conseguinte, as moléculas, fortemente coesas, dispõem-se com regularidade, geralmente formando uma rede cristalina. Assim, os sólidos apresentam forma e volume definidos.

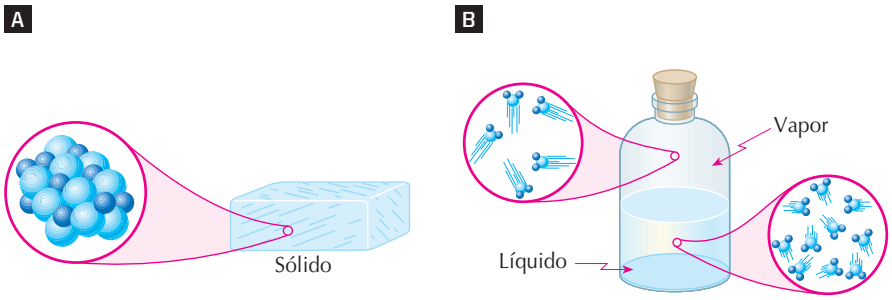


Figura 4. **Representação esquemática de como se apresentam as moléculas do corpo no estado sólido (A) e nos estados líquido e gasoso (B).**

No **estado líquido**, as distâncias entre as moléculas são, em média, maiores que no estado sólido. No entanto, as forças de coesão ainda são apreciáveis e a liberdade de movimentação das moléculas é limitada, havendo apenas o deslizamento de umas em relação às outras (**fig. 4B**). Em consequência, os líquidos apresentam volume definido, mas sua forma é variável, adaptando-se à do recipiente.

No **estado gasoso**, as forças de coesão entre as moléculas têm intensidade muito pequena, possibilitando uma movimentação bem mais intensa que nos outros estados (**fig. 4B**). Consequentemente, os gases e vapores têm a propriedade de se difundir por todo o espaço em que se encontram, não apresentando nem forma nem volume definidos.

Tanto uma mistura gasosa como uma mistura homogênea de líquidos apresentam uma única fase – a fase gasosa, no primeiro caso, e a fase líquida, no segundo. Uma pedra de gelo flutuando na água constitui um sistema com duas fases distintas: a fase sólida e a fase líquida. Assim, **fase** de um sistema é uma parte geometricamente definida e fisicamente homogênea desse sistema. Por isso, podemos nos referir aos estados de agregação de uma substância como fases da substância.

A água pode se apresentar, na Natureza, em suas três fases: **líquida**, no mar, nos lagos e rios e nas nuvens (em forma de gotículas em suspensão na atmosfera); **vapor**, em mistura com os gases que constituem o ar; **sólida**, nas geleiras, nos *icebergs* e nas crostas de gelo que cobrem os picos das montanhas mais elevadas.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www2.biglobe.ne.jp/~norimari/science/JavaApp/Mole/e-Mole.html (acesso em julho/2009), você poderá, por meio de uma simulação, analisar a diferença entre os estados sólido, líquido e gasoso de uma substância.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

TESTES PROPOSTOS

T. 1 (PUC-Campinas-SP) Sobre o conceito de calor, pode-se afirmar que se trata de uma:

a) medida da temperatura do sistema.
b) forma de energia em trânsito.
c) substância fluida.
d) quantidade relacionada com o atrito.
e) energia que os corpos possuem.

T. 2 (UFSM-RS) Calor é:

a) a energia contida em um corpo.
b) a energia que se transfere de um corpo para outro, quando existe uma diferença de temperatura entre eles.
c) um fluido invisível e sem peso, que é transmitido de um corpo para outro.
d) a transferência de temperatura de um corpo para outro.
e) a energia que se transfere espontaneamente do corpo de menor temperatura para o de maior temperatura.

T. 3 (Unifesp) O SI (Sistema Internacional de Unidades) adota como unidade de calor o joule, pois calor é energia. No entanto, só tem sentido falar em calor como **energia em trânsito**, ou seja, energia que se transfere de um corpo a outro em decorrência da diferença de temperatura entre eles.
Assinale a afirmação em que o conceito de calor está empregado corretamente.

a) A temperatura de um corpo diminui quando ele perde parte do calor que nele estava armazenado.
b) A temperatura de um corpo aumenta quando ele acumula calor.
c) A temperatura de um corpo diminui quando ele cede calor para o meio ambiente.
d) O aumento da temperatura de um corpo é um indicador de que esse corpo armazenou calor.
e) Um corpo só pode atingir o zero absoluto se for esvaziado de todo o calor nele contido.

T. 4 (Unisa-SP) O fato de o calor passar de um corpo para outro deve-se:

a) à quantidade de calor existente em cada um.
b) à diferença de temperatura entre eles.
c) à energia cinética total de suas moléculas.
d) ao número de calorias existentes em cada um.
e) Nada do que se afirmou acima é verdadeiro.

T. 5 (UFPR) No século XVII, uma das interpretações para a natureza do calor considerava-o um fluido imponderável que preenchia os espaços entre os átomos dos corpos quentes. Essa interpretação explicava corretamente alguns fenômenos, porém, falhava em outros. Isso motivou a proposição de uma outra interpretação, que teve origem em trabalhos de Mayer, Rumford e Joule, entre outros pesquisadores.
Com relação aos conceitos de temperatura, calor e trabalho atualmente aceitos pela Física, avalie as seguintes afirmativas:

I. Temperatura e calor representam o mesmo conceito físico.
II. Calor e trabalho estão relacionados com transferência de energia.
III. A temperatura de um gás está relacionada com a energia cinética de agitação de suas moléculas.

Assinale a alternativa correta.

a) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.
b) Somente a afirmativa I é verdadeira.
c) Somente a afirmativa II é verdadeira.
d) Somente a afirmativa III é verdadeira.
e) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.

T. 6 (UFV-MG) Quando dois corpos de materiais diferentes estão em equilíbrio térmico, isolados do meio ambiente, pode-se afirmar que:

a) o mais quente é o que possui menor massa.
b) apesar do contato, suas temperaturas não variam.
c) o mais quente fornece calor ao mais frio.
d) o mais frio fornece calor ao mais quente.
e) suas temperaturas dependem de suas densidades.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

T. 7 (UFRGS-RS) Selecione a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto abaixo, na ordem em que elas aparecem.

Quando um corpo mais quente entra em contato com um corpo mais frio, depois de certo tempo ambos atingem a mesma temperatura. O que será que "passa" de um corpo para o outro quando eles estão a diferentes temperaturas? Será que é transferida a própria temperatura?

Em 1770, o cientista britânico Joseph Black obteve respostas para essas questões. Ele mostrou que, quando misturamos partes iguais de um líquido (leite, por exemplo) a temperaturas iniciais diferentes, as temperaturas de ambas as partes _____ significativamente; no entanto, se derramarmos um copo de leite morno num balde cheio de água com vários cubos de gelo fundente, e isolarmos esse sistema como um todo, a temperatura do leite sofrerá uma mudança significativa, mas a temperatura da mistura de água e gelo não. Com esse simples experimento, fica confirmado que "aquilo" que é transferido nesse processo _____ a temperatura.

A fim de medir a temperatura da mistura de gelo e água, um termômetro, inicialmente à temperatura ambiente, é introduzido no sistema e entra em equilíbrio térmico com ele. Nesse caso, o termômetro _____ uma variação em sua própria temperatura.

a) mudam — não é — sofre
b) não mudam — é — sofre
c) mudam — não é — não sofre
d) mudam — é — não sofre
e) não mudam — é — não sofre

T. 8 (Fatec-SP) Três corpos encostados entre si estão em equilíbrio térmico. Nessa situação:

a) os três corpos apresentam-se no mesmo estado físico.
b) a temperatura dos três corpos é a mesma.
c) o calor contido em cada um deles é o mesmo.
d) o corpo de maior massa tem mais calor que os outros dois.
e) há mais de uma proposição correta.

T. 9 Dois corpos A e B, de massas m_A e m_B tais que $m_A > m_B$, estão às temperaturas θ_A e θ_B, respectivamente, com $\theta_A \neq \theta_B$. Num dado instante, eles são postos em contato. Ao alcançarem o equilíbrio térmico, teremos para as temperaturas finais θ'_A e θ'_B:

a) $\theta'_A > \theta'_B$ b) $\theta'_A = \theta'_B$ c) $\theta'_A < \theta'_B$ d) $\theta'_A \neq \theta'_B$

T. 10 Se dois corpos estiverem em equilíbrio térmico com um terceiro, conclui-se que:

a) os três acham-se em repouso.
b) os dois corpos estão em equilíbrio térmico entre si.
c) a diferença entre as temperaturas dos corpos é diferente de zero.
d) a temperatura do terceiro corpo aumenta.
e) os dois corpos possuem a mesma quantidade de calor.

T. 11 (FEI-SP) Um sistema isolado termicamente do meio possui três corpos, um de ferro, um de alumínio e outro de cobre. Após um certo tempo, verifica-se que as temperaturas do ferro e do alumínio aumentaram. Podemos concluir que:

a) o corpo de cobre também aumentou a sua temperatura.
b) o corpo de cobre ganhou calor do corpo de alumínio e cedeu calor para o corpo de ferro.
c) o corpo de cobre cedeu calor para o corpo de alumínio e recebeu calor do corpo de ferro.
d) o corpo de cobre permaneceu com a mesma temperatura.
e) o corpo de cobre diminuiu a sua temperatura.

T. 12 As forças de coesão entre as moléculas de uma substância:

a) são mais intensas no estado gasoso do que nos estados sólido e líquido, em virtude de maior agitação.
b) são menos intensas no estado sólido do que nos estados gasoso e líquido, em vista da estrutura cristalina.
c) não dependem do estado de agregação da substância.
d) têm maior intensidade no estado sólido e menos intensidade no estado gasoso.
e) têm intensidade desprezível no estado sólido.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.