

Capítulo -3

CALOR E TRABALHO

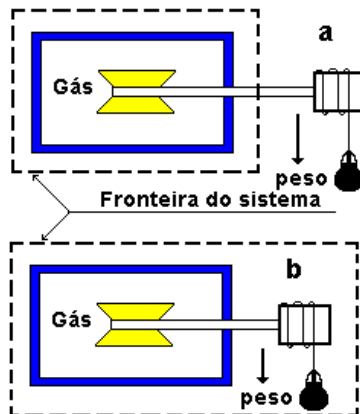


Figura 3.1-7 - exemplo mostrando como a escolha do sistema determina se o trabalho está ou não envolvido no processo

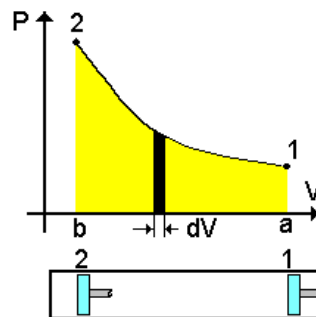
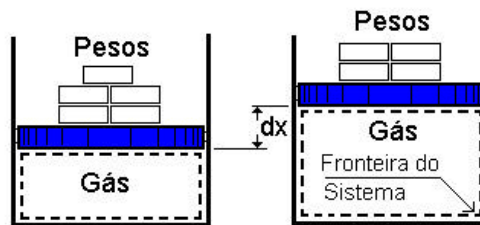


Figura 3.1-4 - Uso do diagrama $P \times V$ para mostrar o trabalho realizado devido ao movimento de froteira

3 - CALOR E TRABALHO

Trabalho e calor são a essência da termodinâmica. Assim é fundamental que o estudante de termodinâmica entenda claramente as duas definições tendo em vista que a análise correta de muitos problemas térmicos dependem da distinção entre elas.

3.1 - Trabalho

Podemos definir o trabalho termodinâmico como: "**Um sistema realiza trabalho se o único efeito sobre o meio (tudo externo ao sistema) PUDER SER o levantamento de um peso.**"

Note-se que o levantamento de um peso é realmente uma força que age através de uma distância. Observe também que nossa definição não afirma que um peso foi realmente levantado ou que uma força agiu realmente através de uma dada distância, **mas que o único efeito externo ao sistema poderia ser o levantamento de um peso.**

O trabalho realizado por um sistema é considerado positivo e o trabalho realizado sobre o sistema é negativo. O símbolo **W** designa o trabalho termodinâmico.

Em geral falaremos de trabalho como uma forma de energia. Vamos ilustrar a definição de trabalho fazendo uso de dois exemplos. Considere como sistema a bateria e o motor elétrico delimitados pela fronteira como mostrados na figura 3.1-1a, e façamos com que o motor acione um ventilador. A pergunta que segue é a seguinte: O trabalho atravessará a fronteira do sistema neste caso? Para responder a essa pergunta usando a definição de trabalho termodinâmico dada anteriormente vamos substituir o ventilador por um conjunto de polia e peso como mostra a figura 3.1-1b. Com a rotação do motor um peso pode ser levantado e o único efeito no meio é tão somente o levantamento de um peso. Assim para o nosso sistema original da Fig. 3.1-1a concluímos que o trabalho atravessa a fronteira do sistema.

Agora, façamos com que o nosso sistema seja constituído somente pela bateria como mostra a figura 3.1-2. Neste caso quem cruza a fronteira do sistema é a energia elétrica da bateria. Constitui trabalho termodinâmico a energia elétrica cruzando a fronteira do sistema?. Sem dúvida, como o conjunto é o mesmo do caso anterior, poderá ocorrer o levantamento de um peso, então energia elétrica cruzando a fronteira do sistema também constitui trabalho como definido anteriormente.

Unidades de Trabalho - Como já foi observado, consideramos trabalho realizado por um sistema, tal como o realizado

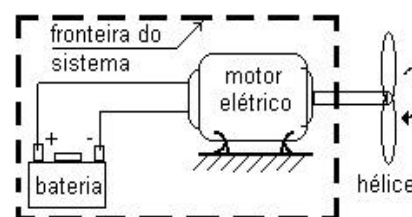


Figura 3.1-1a - Trabalho termodinâmico

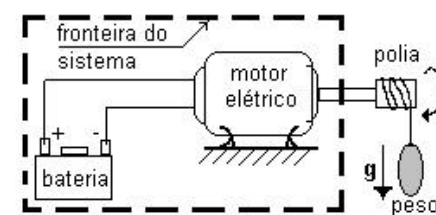


Figura 3.1-1b - Trabalho termodinâmico

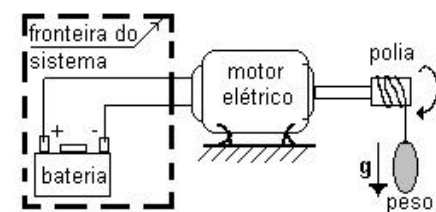


Figura 3.1-2 - Trabalho termodinâmico

por um gás em expansão contra um êmbolo, como positivo, e o trabalho realizado sobre o sistema, tal como o realizado por um êmbolo ao comprimir um gás, como negativo. Assim, trabalho negativo significa que energia é acrescentada ao sistema.

Nossa definição de trabalho envolve o levantamento de um peso, isto é, o produto de uma unidade de força (**Newton**) agindo através de uma distância (**metro**). Essa unidade de trabalho no sistema Internacional é chamada de **Joule**, (J).

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$$

Definimos POTÊNCIA como trabalho por unidade de tempo, e a representamos por \dot{W} . Assim

$$\dot{W} \equiv \frac{\delta w}{dt}$$

a unidade de potência é Joule por segundo, denominada Watt (W)

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Trabalho Realizado Devido ao Movimento de Fronteira de um Sistema Compressível Simples num Processo Quase-Estático - Já observamos que há várias maneiras pelas quais o trabalho pode ser realizado sobre ou por um sistema. Elas incluem o trabalho realizado por um eixo rotativo, trabalho elétrico e o trabalho realizado devido ao movimento da fronteira do sistema, tal como o efetuado pelo movimento do êmbolo num cilindro. Neste curso vamos considerar com alguns detalhes o trabalho realizado pelo movimento da fronteira do sistema compressível simples durante um processo quase-estático.

Consideremos como sistema o gás contido num cilindro com êmbolo, como mostrado na Fig 3.1-3. Vamos tirar um dos pequenos pesos do êmbolo provocando um movimento para cima deste, de uma distância dx . Podemos considerar este pequeno deslocamento de um processo quase-estático e calcular o trabalho, δW , realizado pelo sistema durante este processo. A força total sobre o êmbolo é $P \cdot A$, onde P é a pressão do gás e A é a área do êmbolo. Portanto o trabalho dW é:

$$\delta W = P A dx \quad (3.1-1)$$

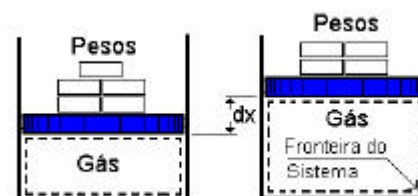


Figura 3.1-3 - Exemplo de trabalho efetuado pelo movimento de fronteira de um sistema num processo quase-estático

Porém, da Fig. 3.1-3 verificamos que $A dx = dV$, a variação do volume do gás devido ao deslocamento, dx , do êmbolo logo:

$$\delta W = P dV \quad (3.1-2)$$

O trabalho realizado devido ao movimento de fronteira, durante um dado processo quase-estático, pode ser determinado pela integração da Eq. 3.1-2. Entretanto essa integração somente pode ser efetuada se conhecermos a relação en-

tre P e V durante esse processo. Essa relação pode ser expressa na forma de uma equação ou pode ser mostrada na forma gráfica.

Consideremos "em primeira" a solução gráfica, usando como exemplo um processo de compressão tal como o que ocorre durante a compressão de ar em um cilindro como mostra a Fig. 3.1-4. No início do processo o êmbolo está na posição 1 e a pressão é relativamente baixa. Esse estado está representado no diagrama $P \times V$ como mostra a figura. No fim do processo, o êmbolo está na posição 2 e o estado correspondente do sistema é mostrado pelo ponto 2 no diagrama $P \times V$. Vamos admitir que essa compressão seja um processo quase-estático e que, durante o processo, o sistema passe através dos estados mostrados pela linha que liga os pontos 1 e 2 do diagrama $P \times V$. A hipótese de um processo quase-estático, aqui, é essencial, porque cada ponto da linha 1-2 representa um estado definido e estes estados correspondem aos estados reais do sistema somente se o desvio do equilíbrio for infinitesimal. O trabalho realizado sobre o gás durante este processo de compressão pode ser determinado pela integração da Eq. 3.1-2, resultando:

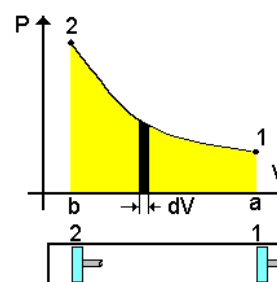


Figura 3.1-4 - Uso do diagrama $P \times V$ para mostrar o trabalho realizado devido ao movimento de frotreira

$${}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 P dV \tag{3.1-3}$$

O símbolo ${}_1W_2$ deve ser interpretado como o trabalho realizado durante o processo, do estado 1 ao estado 2. Pelo exame do diagrama $P \times V$, é evidente que o trabalho realizado durante esse processo é representado pela área sob a curva 1-2, ou seja a área, a-1-2-b-a. Neste exemplo, o volume diminuiu e a área a-1-2-b-a representa o trabalho realizado sobre o sistema (trabalho negativo). Se o processo tivesse ocorrido do estado 2 ao estado 1, pelo mesmo caminho, a mesma área representaria o trabalho realizado pelo sistema (trabalho positivo). Uma nova consideração do diagrama $P \times V$, Fig. 3.1-5, conduz a uma outra conclusão importante. É possível ir do estado 1 ao estado 2 por caminhos quase-estáticos muito diferentes, tais como A, B ou C. Como a área sob a curva representa o trabalho para cada processo é evidente que o trabalho envolvido em cada caso é uma função não somente dos estados iniciais e finais do processo, mas também, do caminho que se percorre ao ir de um estado a outro.

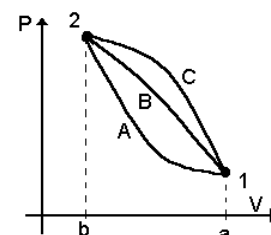


figura 3.1-5-Vários processos quase-estáticos entre dois estados dados.

Por esta razão, o trabalho é chamado de função de linha, ou em linguagem matemática, δW é uma diferencial *inexata*.

Na determinação da integral da Eq. 3.1-3 devemos sempre lembrar que estamos interessados na determinação da área situada sob a curva da Fig. 3.1-4. Relativamente a este aspecto, identificamos duas classes de problemas:

1- A relação entre P e V é dada em termos de dados experimentais ou na forma gráfica (como, por exemplo, o traço em um osciloscópio) Neste caso podemos determinar a integral da Eq. 3.1-3 por integração gráfica ou numérica.

2- A relação entre P e V é tal que seja possível ajustar uma relação analítica entre eles, e podemos então, fazer diretamente a integração.

Um exemplo comum desse segundo tipo de relação é o caso de um processo chamado politrópico, no qual $P V^n = \text{constante}$, através de todo o processo. O expoente " n " pode tomar qualquer valor entre $-\infty$ e $+\infty$ dependendo do processo particular sob análise.

$$P V^n = \text{constante} = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \quad \rightarrow \quad P = \frac{\text{constante}}{V^n} = \frac{P_1 V_1^n}{V^n} = \frac{P_2 V_2^n}{V^n}$$

Para esse tipo de processo, podemos integrar a Eq. 3.1-3, resultando em:

$$\int_1^2 P dV = \text{constante} \int_1^2 \frac{dV}{V^n} = \text{constante} \left(\frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right) \Big|_1^2 = \frac{\text{constante}}{1-n} (V_2^{1-n} - V_1^{1-n}) =$$

$$\frac{P_2 V_2^n V_2^{1-n} - P_1 V_1^n V_1^{1-n}}{1-n} \quad \rightarrow \quad \int_1^2 P dV = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} \quad (3.1-4)$$

Note-se que este resultado, Eq. 3.1-4, é válido para qualquer valor do expoente n , exceto $n = 1$. No caso onde $n = 1$, tem-se;

$$P V = \text{Constante} = P_1 V_1 = P_2 V_2, \quad \text{e portanto,}$$

$$\int_1^2 P dV = P_1 V_1 \int_1^2 \frac{dV}{V} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.1-5)$$

Deve-se observar que nas Eq^s. 3.1-4 e 3.1-5 não dissemos que o trabalho é igual às expressões dadas por aquelas equações. Aquelas expressões fornecem o valor de uma certa integral, ou seja, um resultado matemático. Considerar ou não, que aquela integral corresponde ao trabalho num dado processo, depende do resultado de uma análise termodinâmica do processo. É importante manter separado o resultado matemático da análise termodinâmica, pois há muitos casos em que o trabalho não é dado pelas Eq^s. 3.1-4 ou 3.1-5. O processo politrópico conforme já descrito, expõe uma relação funcional especial entre P e V durante um processo. Há muitas relações possíveis, algumas das quais serão examinadas nos problemas apresentados no final deste capítulo.

Exemplo 3.1-1

Considere como sistema o gás contido no cilindro mostrado na figura, provido de um êmbolo sobre o qual são colocados vários pesos pequenos. A pressão inicial é de 200 kPa e o volume inicial do gás é de 0,04 m³.

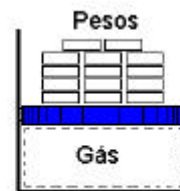


Figura para o exemplo 3.1-1

a) Coloquemos um bico de Bunsen embaixo do cilindro e deixemos que o volume do gás aumente para 0,1 m³, enquanto a pressão permanece constante. Calcular o trabalho realizado pelo sistema durante esse processo.

como a pressão, neste caso é constante, concluímos pela Eq. 3.1- 3;

$${}_1W_2 = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1) \quad \rightarrow \quad {}_1W_2 = 200 \text{ kPa} \times (0,1 - 0,04) \text{ m}^3 = 12,0 \text{ kJ}$$

b) Consideremos o mesmo sistema e as mesmas condições iniciais e finais, porém, ao mesmo tempo que o bico de Bunsen está sob o cilindro e o êmbolo se levanta, removamos os pesos deste, de tal maneira que durante o processo a temperatura se mantém constante.

Se admitirmos que o gás se comporta como gás ideal, então da Eq. 2.3.3, obtemos:

$$PV = mRT$$

e notamos que este processo é politrópico com o expoente $n = 1$, pois a massa, m , do sistema é constante, R é a constante do gás e sendo T constante, $mRT = \text{constante}$. Da nossa análise anterior, concluímos que o trabalho é dado pela Eq. 3.1-5, Portanto:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 200 \text{ kPa} \times 0,04 \text{ m}^3 \times \ln \frac{0,1}{0,04} = 7,33 \text{ kJ}$$

c) Consideremos o mesmo sistema porém, durante a troca de calor removamos os pesos de tal maneira que a expressão $PV^{1,3} = \text{constante}$ descreva a relação entre a pressão e o volume durante o processo. Novamente o volume final é 0,1 m³. Calcular o trabalho.

Esse processo é politrópico, no qual $n = 1,3$. Analisando o processo, concluímos novamente que o trabalho é dado pela Eq. 3.1- 4, assim:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{1,3} = 200 \left(\frac{0,04}{0,1} \right)^{1,3} = 60,77 \text{ kPa}$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - 1,3} = \frac{60,77 \times 0,1 - 200 \times 0,04}{1 - 1,3} = 6,41 \text{ kJ}$$

d) Consideremos o sistema e o estado inicial dados nos três primeiros exemplos, porém mantenhamos o êmbolo preso por meio de um pino, de modo que o volume permaneça constante. Além disso façamos com que o calor seja transferido do sistema para o meio até que a pressão caia a 100 kPa. Calcular o trabalho.

Como $\delta W = P \cdot dV$, para um processo quase-estático, o trabalho é igual a zero porque, neste caso, não há variação do volume, isto é, $dV=0$.

O processo em cada um dos quatro exemplos está mostrado na Figura ao lado. O processo 1-2a é um processo a **pressão constante** e a área 1-2a-f-e-1 representa o respectivo trabalho. Analogamente, a linha 1-2-b representa o processo em que **PV = constante**, a linha 1-2c representa o processo em que **PV^{1,3} = constante** e a linha 1-2d representa o processo a **volume constante**. O estudante deve comparar as áreas relativas sob cada curva com os resultados numéricos obtidos acima.

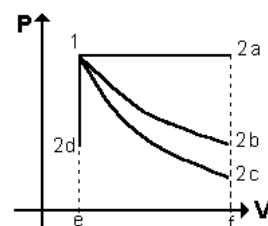
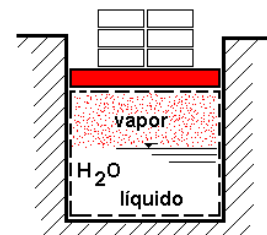


Diagrama Pressão-Volume mostrando o trabalho realizado nos vários processos do exemplo 3.1-1.

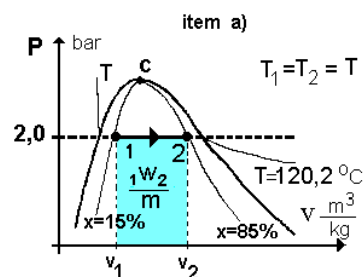
Exemplo 3.1-2

Um cilindro com êmbolo móvel, como mostrado na figura, contém 3 kg d'água no estado de vapor úmido com título igual a 15 % e pressão de 2,0 bar (estado 1). Esse sistema é aquecido à pressão constante até se obter o título igual a 85 % (estado 2). Pede-se:



- a) Representar o processo em um diagrama P-V.
- b) Calcular o trabalho realizado pelo vapor durante o processo.

Resposta a)



Resposta b)

Da definição de Trabalho termodinâmico devido ao movimento de fronteira, e sendo a massa do sistema constante, temos:

$${}_1W_2 = \int_1^2 PdV = P \int_1^2 mdv = P.m \int_1^2 dv = P.m.(v_2 - v_1) \quad (1)$$

Assim, para calcularmos o ${}_1W_2$ precisamos determinar o valor do volume específico 1 e 2. Considerando a tabela de propriedades da água saturada para $P = 2,0$ bar temos:

$$V_L = 0,0010605 \text{ m}^3/\text{kg} \quad V_V = 0,8857 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Da definição de título e da relação entre título e uma propriedade qualquer na região de vapor úmido temos:

$$V = V_L + X_x (V_V - V_L)$$

$$V_1 = 0,0010605 + 0,15 (0,8857 - 0,0010605)$$

$$V_1 = 0,133756 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_2 = 0,0010605 + 0,85 (0,8857 - 0,0010605)$$

$$V_2 = 0,7530 \text{ m}^3/\text{kg}$$

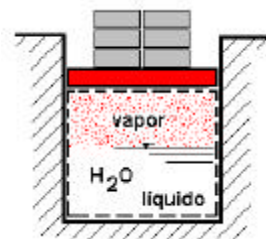
Substituindo na expressão do trabalho, Eq.(1) temos:

$${}_1W_2 = 2,0 \cdot 10^5 \times 3 \times (0,7530 - 0,133756) \quad [J]$$

$${}_1W_2 = 3,715 \cdot 10^5 \text{ [J]} \quad \text{ou} \quad {}_1W_2 = 371,5 \text{ [kJ]}$$

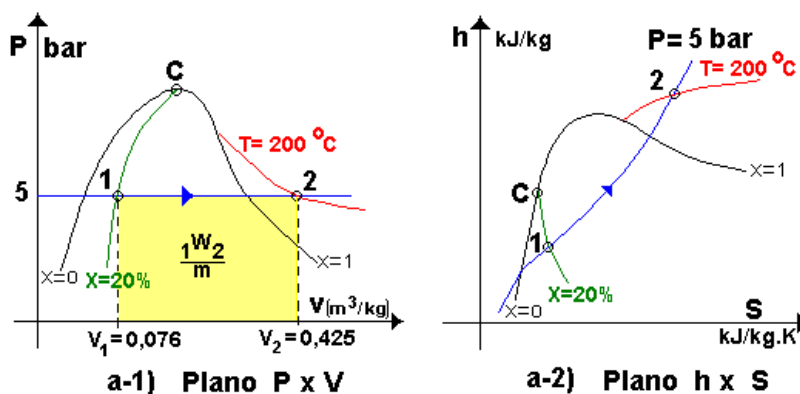
Exemplo 3.1-3

Um cilindro com êmbolo móvel, como mostrado na figura, contém 5 kg d'água no estado de vapor úmido com título igual a 20 % e pressão de 5,0 bar (estado 1). Esse sistema é aquecido à pressão constante até se obter a temperatura de 200 °C (estado 2). Pede-se:



- a) Representar o processo em um diagrama P-v e h-s
- b) Determinar o trabalho realizado pela substância de trabalho contra o êmbolo, em kJ

Solução



b) O trabalho devido ao movimento de fronteira é:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV \quad \text{como } P = \text{constante, então}$$

$${}_1W_2 = m P \int_1^2 dv = m P (v_2 - v_1)$$

Da tabela de propriedades de saturação, para o estado 1, $P_1 = 5,0 \text{ bar}$ obtemos

$$V_{ls1} = 0,0010926 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad V_{vs1} = 0,3749 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$V_1 = V_{ls1} + X_1 (V_{vs1} - V_{ls1}) = 0,0010926 + 0,2 (0,3749 - 0,0010926)$$

$$V_1 = 0,0759 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Da tabela de vapor superaquecido para $P_2 = 5,0 \text{ bar}$ e $T_2 = 200 \text{ °C}$, obtemos

$$V_2 = 0,4249 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Assim o trabalho entre o estado 1 e 2 resulta

$${}_1W_2 = 5,0 \text{ kg} \times 5,0 \frac{10^5}{10^3} \text{ kPa} \times (0,4249 - 0,0759) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 872,5 \text{ kJ}$$

Sistemas que Envolvem Outras Formas de Realização de Trabalho

Há sistemas que envolvem outras formas de trabalho, como por exemplo: sistemas que envolvem trabalho magnético e sistemas que envolvem trabalho elétrico. Também existem outros sistemas que envolvem trabalho devido ao movimento de fronteira; um fio esticado sujeito a uma força e uma película superficial.

Deve-se observar também que há outras formas de trabalho que podem ser identificadas em processos que não sejam quase-estáticos. Um exemplo disso é o trabalho realizado por forças de cisalhamento, num processo que envolve atrito num fluido viscoso, ou trabalho realizado por um eixo rotativo que atravessa a fronteira do sistema.

A identificação do trabalho é um aspecto importante de muitos problemas termodinâmicos. Já mencionamos que o trabalho só pode ser identificado nas fronteiras do sistema. Por exemplo, consideremos a Fig 3.1-6 que mostra um gás separado do vácuo por uma membrana. Fazendo com que a membrana se rompa, o gás encherá todo o volume. Desprezando-se qualquer trabalho associado com a ruptura da membrana, podemos indagar se há trabalho envolvido no processo. Se tomarmos como nosso sistema o gás e o espaço evacuado, concluímos prontamente que não há trabalho envolvido, pois nenhum trabalho é identificado na fronteira do sistema. Se, entretanto, tomarmos o gás como sistema, teremos uma variação do volume e poderemos ser induzidos a calcular o trabalho pela integral

$$\int_1^2 PdV$$

Entretanto este não é um processo quase-estático e, portanto, o trabalho não pode ser calculado por aquela relação. Ao contrário, como não há resistência na fronteira do sistema quando o volume aumenta, concluímos que, para este sistema não há trabalho envolvido.

Um outro exemplo pode ser citado com a ajuda da Fig. 3.1-7. Na Fig. 3.1-7a, o sistema consiste no recipiente mais o gás. O trabalho atravessa a fronteira do sistema no ponto onde a fronteira intercepta o eixo e pode ser associado como forças de cisalhamento no eixo rotativo. Na Fig. 3.1-7b, o sistema inclui o eixo e o peso, bem como o gás e o recipiente. Neste caso não há trabalho atravessando a fronteira do sistema, quando o peso se move para baixo. Como veremos mais adiante, podemos identificar uma variação de energia potencial dentro do sistema, porém, isto não deve ser confundido com trabalho atravessando a fronteira do sistema.

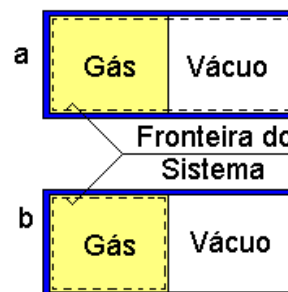


Figura 3.1-6 - exemplo de um processo que envolve uma variação de volume, para o qual o trabalho é zero

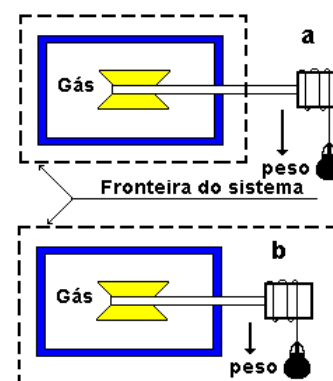
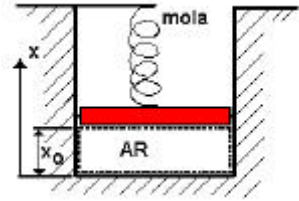


Figura 3.1-7 - exemplo mostrando como a escolha do sistema determina se o trabalho está ou não envolvido no processo

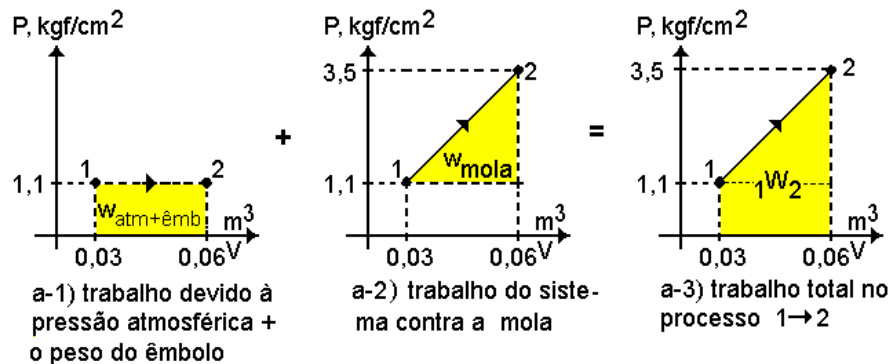
Exemplo 3.1-4

Considere o sistema mostrado na figura ao lado. O volume inicial do ar no interior do conjunto êmbolo-cilindro é de $0,03 \text{ m}^3$, neste estado a pressão interna é de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$, suficiente para contrabalançar a pressão atmosférica externa e o peso do êmbolo. A mola toca o êmbolo mas não exerce qualquer força sobre o mesmo nesse estado. O sistema (ar) é então aquecido até que o volume do sistema seja o dobro do volume inicial. A pressão final do sistema é de $3,5 \text{ kgf/cm}^2$ e, durante o processo a força de mola é proporcional ao deslocamento do êmbolo a partir da posição inicial. Pede-se:



- a) Mostrar o processo em um diagrama, P - v
- b) Considerando o ar como sistema, calcular o trabalho realizado pelo sistema

Solução: a)



b) sendo o trabalho ${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$, e, sendo $P = (P_{atm} + P_{\hat{e}mb} + P_{mola})$, temos:

$${}_1W_2 = \int_1^2 (P_{atm} + P_{emb} + P_{mola}) dV \quad \text{ou} \quad {}_1W_2 = \int_1^2 (P_{atm} + P_{emb}) dV + \int_1^2 P_{mola} dV$$

a pressão atmosférica + o peso do êmbolo é constante, e no sistema internacional vale

$$P_{\hat{e}mb} + P_{atm} = 1,1 \times 9,81 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 10,791 \times 10^4 \text{ Pa}$$

logo, o trabalho correspondente será:

$${}_1W_{2(atm)} = 10,791 \times 10^4 \int_1^2 dV = 10,791 \times 10^4 [2V_1 - V_1] = 10,791 \times 10^4 (2 \times 0,03 - 0,03) \rightarrow {}_1W_{2(ATM)} = 3,2373 \text{ kJ}$$

O trabalho devido à força de mola contra o êmbolo será

$${}_1W_2 = \int P_{mola} dV \quad \text{mas,} \quad P_{mola} = F(\text{volume}),$$

assim devemos determinar primeiro qual a função que relaciona a pressão devido à mola com relação à variação do volume.

Entretanto, como $\int_1^2 P dV$ representa a área sob a curva, podemos resolver a integral calculando

diretamente a área sob a curva da figura a-2. Como sabemos, a área de um triângulo retângulo é $A = (b \times h)/2$, onde, para este caso, $b = (V_2 - V_1) = (0,06 - 0,03) = 0,03 \text{ m}^3$, e $h = (P_2 - P_1) = (3,5 - 1,1) \times 9,81 \times 10^4 \text{ Pa} = 23,544 \times 10^4 \text{ Pa}$

$$\text{logo,} \quad W_{mola} = \frac{0,03 \times 23,544 \times 10^4}{2} = 3,5316 \text{ kJ}$$

O trabalho total do processo, nada mais é que a soma dos dois trabalhos anteriores, como mostra a área sob a curva na figura a-3, ou seja:

$${}_1W_2 = W_{atm} + W_{mola} = 3,237 + 3,5316 \rightarrow {}_1W_2 = 6,7686 \text{ kJ}$$

3-2 CALOR

A definição termodinâmica de calor é um tanto diferente da interpretação comum da palavra. Portanto, é importante compreender claramente a definição de calor dada aqui, porque ela se envolve em muitos problemas térmicos da engenharia.

Se um bloco de cobre quente for colocado em um béquer de água fria, sabemos, pela experiência, que o bloco de cobre se resfria e a água se aquece até que o cobre e a água atinjam a mesma temperatura. O que causa essa diminuição de temperatura do cobre e o aumento de temperatura da água? Dizemos que isto é resultado da transferência de energia do bloco de cobre à água. É dessa transferência de energia que chegamos a uma definição de calor.

Calor é definido como sendo a forma de energia transferida, através da fronteira de um sistema a uma dada temperatura, a um outro sistema (ou meio) numa temperatura inferior, em virtude da diferença de temperatura entre os dois sistemas. Isto é, o calor é transferido do sistema de maior temperatura ao sistema de temperatura menor e a transferência de calor ocorre unicamente devido à diferença de temperatura entre os dois sistemas. Um outro aspecto dessa definição de calor é que um corpo ou sistema nunca contém calor. Ou melhor, calor só pode ser identificado quando atravessa a fronteira. Assim o calor é um fenômeno transitório. Se considerarmos o bloco quente de cobre como um sistema e a água fria do béquer como outro sistema reconhecemos que originalmente nenhum sistema contém calor (eles contêm energia, naturalmente). Quando o cobre é colocado na água e os dois estão em "comunicação térmica", o calor é transferido do cobre à água, até que seja estabelecido o equilíbrio de temperatura. Nenhum sistema contém calor no fim do processo. Infere-se, também, que o calor é identificado somente na fronteira do sistema, pois o calor é definido como sendo a energia transferida através da fronteira do sistema.

Unidades de Calor - Conforme já discutimos, o calor, como o trabalho, é uma forma de transferência de energia para ou de um sistema. Portanto, as unidades de calor, ou sendo mais geral, para qualquer outra forma de energia, são as mesmas do trabalho, ou pelo menos, são diretamente proporcionais a ela. No sistema Internacional, SI, a unidade de calor (e de qualquer outra forma de energia) é o Joule.

Calor transferido **para** um sistema é considerado positivo e transferido **de** um sistema é negativo. O calor é normalmente representado pelo símbolo **Q**.

Um processo em que não há troca de calor (**Q = 0**), é chamado de processo **adiabático**.

Do ponto de vista matemático o calor, como o trabalho, é uma função de linha e é reconhecido como tendo uma **diferencial inexata**. Isto é, a quantidade de calor transferida quando o sistema sofre uma mudança, do estado 1 para o estado 2, depende do caminho que o sistema percorre durante a mudança de estado. Como o calor é uma função de linha, a sua diferencial é escrita como δQ . Na integração escrevemos:

$$\int_1^2 \delta Q = {}_1Q_2 \quad (3.2-1)$$

em outras palavras, ${}_1Q_2$ é o calor transferido durante um dado processo entre o estado 1 e o estado 2.

O calor transferido para um sistema na unidade de tempo, é chamado taxa de calor, e designado pelo símbolo \dot{Q} , a respectiva unidade é o Watt (W)

$$\dot{Q} \equiv \frac{\delta Q}{dt} \quad (3.2-2)$$

Comparação entre Calor e Trabalho - É evidente, a esta altura, que há muita semelhança entre calor e trabalho, que passaremos a resumir:

a) O calor e o trabalho são, ambos, fenômenos "transitórios". Os sistemas nunca possuem calor ou trabalho, porém qualquer um deles ou, ambos, atravessam a fronteira do sistema, quando o sistema sofre uma mudança de estado.

b) Tanto o calor como o trabalho são fenômenos de fronteira. Ambos são observados somente nas fronteiras do sistema, e ambos representam energia atravessando a fronteira do sistema.

c) Tanto o calor como o trabalho são funções de linha e têm diferenciais inexatas.

Deve-se observar que na nossa convenção de sinais, $+Q$ representa calor transferido ao sistema e, daí é energia acrescentada ao sistema, e $+W$ representa o trabalho realizado pelo sistema, que é energia que sai do sistema. A Fig. 3.2-1 mostra a convenção de sinais que adotamos.

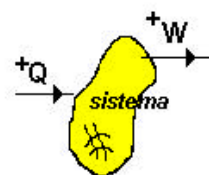


Figura 3.2-1 - Convenção para calor e trabalho

Um esclarecimento final pode ser útil para mostrar a diferença entre calor e trabalho. A Fig. 3.2-2 mostra um gás contido num recipiente rígido. Espiras de resistência elétrica são enroladas ao redor do recipiente. Quando a corrente elétrica circula através das espiras, a temperatura do gás aumenta. O que atravessa a fronteira do sistema, calor ou trabalho ?

Na Fig. 3.2-2a, consideramos somente o gás como sistema. Neste caso calor atravessa a fronteira do sistema, porque a temperatura das paredes é superior à temperatura do gás.

Na Fig. 2.3-2b, o sistema inclui o recipiente e as resistências elétricas. Neste caso a eletricidade atravessa a fronteira do sistema, e como anteriormente indicado, isto é trabalho.

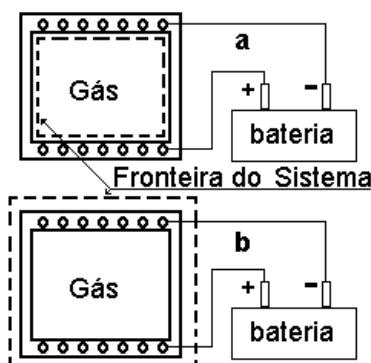


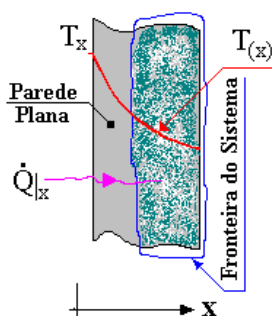
Figura 3.2-2 Exemplo mostrando a diferença entre calor e trabalho

Formas de interação de Calor.

As formas mais comuns de interação de calor são através de :

a) - Condução → Lei de Fourier

A condução de calor pode ser considerada como a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas menos energéticas, graças às interações entre partículas [Incropera, F. P. & Witt, D. P.]. A relação matemática é:



$$\dot{Q}\Big|_x = -kA \frac{dT}{dx}\Big|_x \quad (3.2-3)$$

onde:

k = condutividade térmica

A = área da parede perpendicular à direção x

x = posição onde está sendo calculada a taxa de calor

b) - Radiação térmica → lei de Stefan - Boltzmann

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que estiver em uma temperatura finita. A energia do campo de radiação é transportada pelas ondas eletromagnéticas (ou **fontons** numa outra linguagem). Enquanto a transferência de calor por condução precisa de um meio material, a radiação não necessita de qualquer meio. Na realidade, a transferência de energia por radiação ocorre com maior eficiência no vácuo. A relação matemática para essa forma de calor é:

$$\dot{Q}_e = \epsilon s A T_b^4 \quad (3.2-4)$$

sendo:

ϵ = emissividade, propriedade radiativa da superfície, $0 \leq \epsilon \leq 1$

σ = Constante de Stefan - Boltzmann, $(s = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4})$

T_b = Temperatura termodinâmica da superfície emitente

A = área emitente da superfície

c) - Convecção - Lei de resfriamento de Newton

O modo de transferência convectiva de calor é sustentado pelo movimento molecular aleatório e pelo movimento macroscópico do fluido no interior da camada limite.

A transferência convectiva de calor pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento. Convecção forçada, convecção livre, ou convecção combinada, dependendo da característica do movimento do meio que está em contato com a superfície. Independentemente da natureza particular do processo de transferência de calor por convecção, a equação da taxa apropriada tem a forma: [Incropera, F. P. & Witt, D. P.]

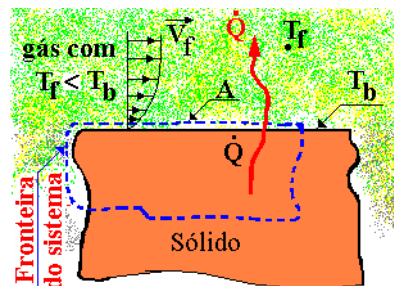
$$\dot{Q} = hA(T_b - T_f) \quad (3.2-5)$$

onde:

A = Área de troca de calor

h = Coeficiente de convecção de calor ou coeficiente de película

T_b , T_f = Respectivamente as temperaturas da superfície e do fluido.

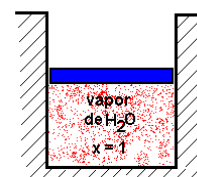


Exercícios:

3-1) - Gás no interior de um conjunto cilindro - êmbolo sofre um processo de expansão de forma que a relação entre pressão e volume é dada por $PV^n = \text{constante}$. A pressão inicial é de 3,0 bar e o volume é de $0,1\text{m}^3$. O volume final do gás após a expansão é de $0,2\text{m}^3$. Determinar o trabalho do sistema, em kJ se: a) $n=1,5$; b) $n=1,0$ e c) $n=0$.
Faça também, a representação dos processos no plano P - V.

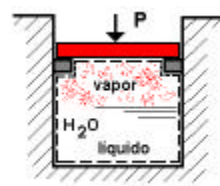
3-2) - Um cilindro com êmbolo móvel contém 2,5 kg de vapor d'água saturado à pressão de 10 kgf/cm^2 . Esse sistema é aquecido à pressão constante até que a temperatura do vapor atinja $260\text{ }^\circ\text{C}$.

- Calcular o trabalho realizado pelo vapor durante o processo.
- Representar o processo em um diagrama P-V.



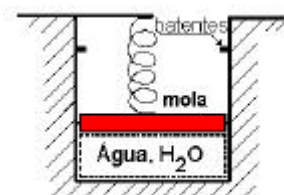
3-3) - O conjunto cilindro - êmbolo mostrado na figura, contém 0,1 kg de água saturada a $40\text{ }^\circ\text{C}$. O êmbolo tem uma área seccional de 400 cm^2 e uma massa de 60 kg o qual repousa sobre os esbarros como mostrado na figura. O volume neste estado inicial é de $0,02\text{ m}^3$. A pressão atmosférica local é de $0,98\text{ kgf/cm}^2$ e a aceleração da gravidade local é de $9,75\text{ m/s}^2$. Transfere-se calor para o sistema até que o cilindro contenha vapor saturado seco. Pede-se:

- Qual a temperatura da água na iminência do êmbolo deixar os esbarros.
- Calcular o trabalho realizado pela água durante todo o processo.



3-4) - Um balão inicialmente vazio, é inflado através de um tanque de ar comprimido. O volume final do balão é $5,0\text{ m}^3$. O barômetro registra 95 kPa. Considere o tanque o balão e a canalização entre ambos como o sistema e determine o trabalho realizado no processo.

3-5) - O cilindro indicado na figura ao lado possui um êmbolo submetido à ação de uma mola de modo que, quando o volume no cilindro for nulo, a mola está totalmente estendida. A força da mola é proporcional ao deslocamento da mesma e o peso do êmbolo é desprezível. O volume do cilindro é de 120 litros quando o êmbolo encontra o batente. O cilindro contém 4,0 kg de água, inicialmente a 350 kPa e título de 1% e que é aquecida até se tornar vapor saturado seco. Mostre o processo num diagrama P x V e, determine: (Desprezar a pressão atmosférica sobre o êmbolo)



- A pressão final do sistema
- o trabalho realizado pela água durante o processo.