

BCJ0205-15

# Fenômenos Térmicos

**Prof. Paramita Barai**

## **Modulo 3: Energia em Processos Térmicos: a Primeira Lei da Termodinâmica**

Capítulo 17 do livro texto  
(Princípios de Física, Serway, Vol. 2)

Unidades 17.4, 17.5, 17.6 (páginas 168 - 175)

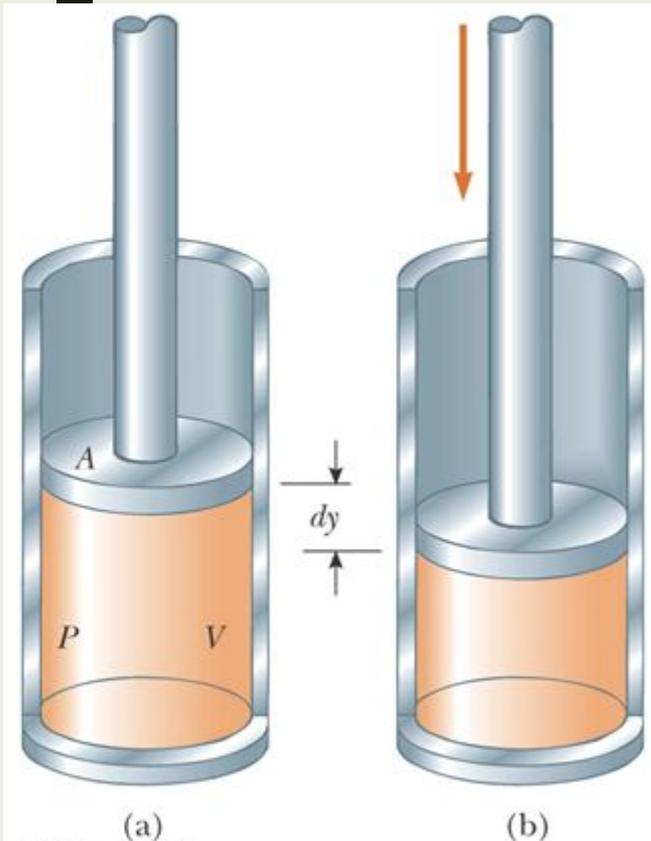
# 3.4 – Trabalho e Calor em Processos Termodinâmicos

- **Variáveis de Estado** : Pressão, Volume, Temperatura, Energia interna.
  - *Descrição macroscópica.*
    - O sistema deve estar em equilíbrio térmico interno (para um gás em um recipiente → todas as partes do gás estejam à mesma **P** e **T**).
- **Variáveis de Transferência** : relevante quando a energia é transferida entre um sistema e seu ambiente.
  - *Associado a uma mudança no estado do sistema.*
  - *Ex.: Calor (só tem valor se a energia passa as fronteiras do sistema).*
- Equação de conservação de energia:  $\Delta E_{\text{sistema}} = \sum T$ 
  - *Lado direito = variáveis de transferência: trabalho, calor, ondas mecânicas, transferência de matéria, radiação eletromagnética, ...*
  - *Lado esquerdo = mudanças nas variáveis de estado: energia cinética, energia potencial e energia interna.*
    - ❖ Em um gás, mais variáveis de estado = pressão, volume, temperatura.

# Trabalho : uma Variável de Transferência

- Trabalho realizado em um sistema de gás contido em um cilindro com um pistão móvel e sem atrito.

- Área de face do pistão =  $A$
- Volume do gás =  $V$
- Pressão uniforme do gás =  $P$



- Modelo simplificado: O gás é comprimido por meio de um processo estático
  - Sistema permanece em equilíbrio térmico.

- Força externa  $F_{\text{ext}}$  empurra o pistão para dentro
- Deslocamento da face inferior do pistão:  $dr = dy$
- Trabalho feito no gás é:

$$dW = \vec{F}_{\text{ext}} \cdot d\vec{r} = \vec{F}_{\text{ext}} \cdot dy\hat{j}$$

# Trabalho

- Magnitude da força exercida pelo gás =  $P A$
- O pistão está sempre em equilíbrio
- Força exercida pelo gás tem a mesma magnitude que a força externa, mas na direção oposta:

$$\vec{F}_{\text{ext}} = -\vec{F}_{\text{gas}} = -PA\hat{j}$$

- Trabalho feito no gás pela força externa:

$$dW = \vec{F}_{\text{ext}} \cdot dy\hat{j} = (-PA\hat{j}) \cdot dy\hat{j}$$
$$dW = -PA dy = -P dV$$

- Variação no volume do gás:  $A dy = dV$

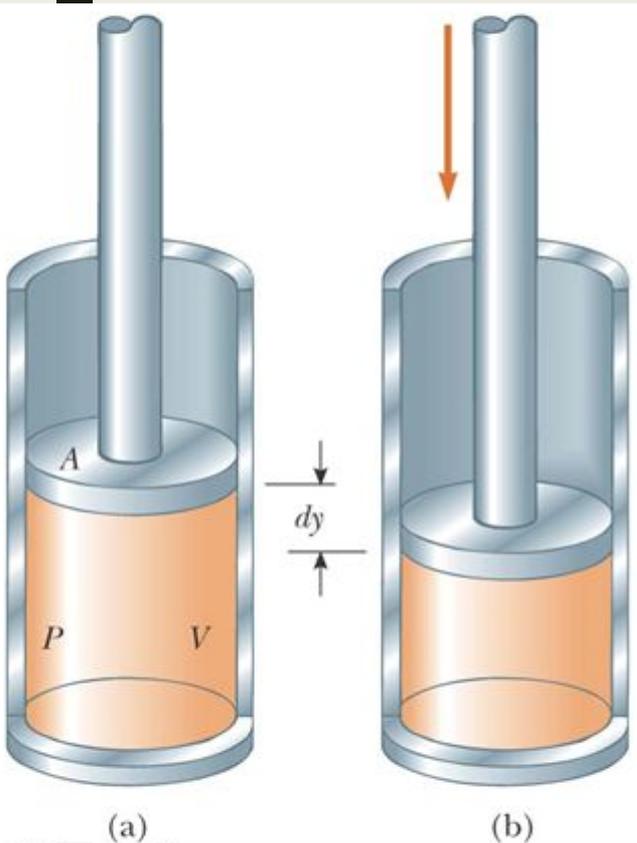
➤ Se o gás está comprimido :  
→  $dV$  é negativo,  $dW$  é positivo.

➤ Se o gás se expande :  
→  $dV$  é positivo,  $dW$  é negativo.

➤ Se o volume permanecer constante :  
→ Trabalho realizado no gás = 0.

■ O trabalho total feito no gás conforme seu volume muda de  $V_i$  até  $V_f$ :

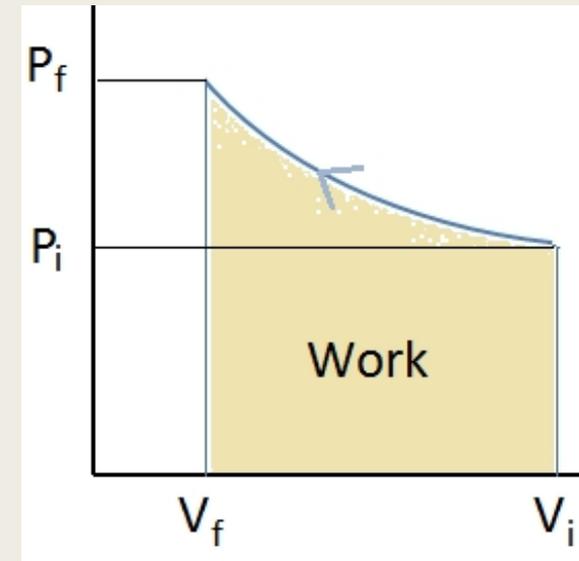
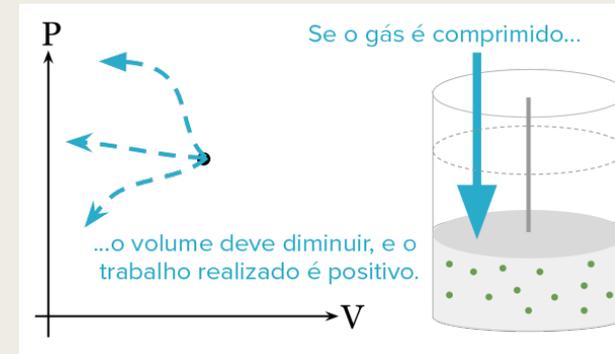
$$W = \int dW = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$



$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

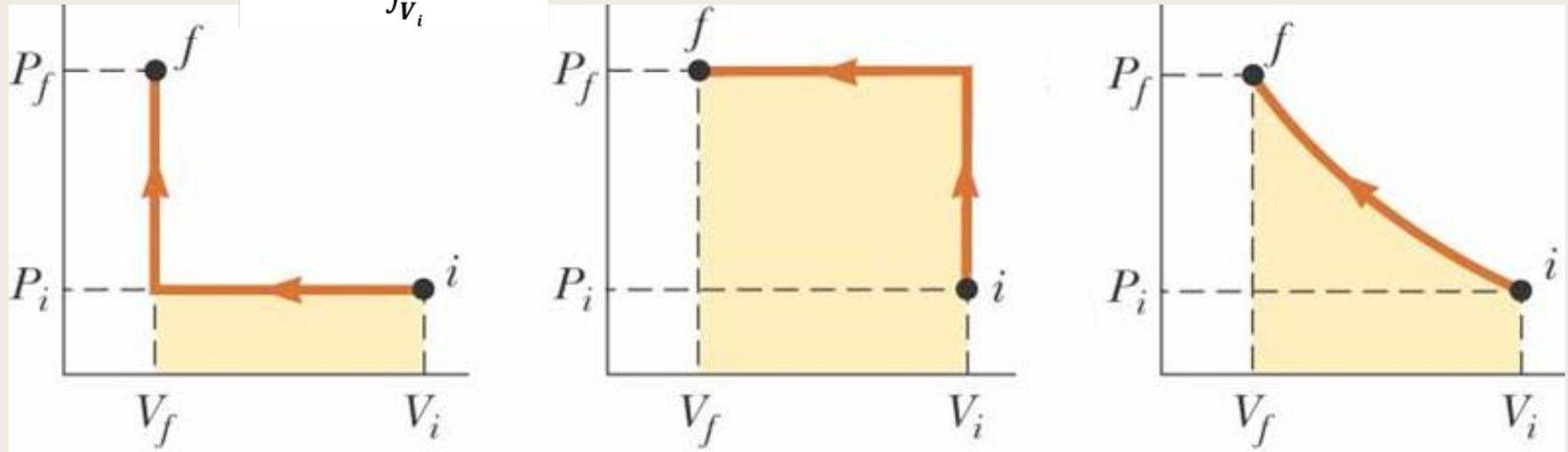
# Trabalho Feito no Gás

- Quando o gás vai de seu estado inicial para seu estado final, seu **V**, **T** e **P** mudam.
- **Diagrama PV** : gráfico do estado do gás em cada estágio
  - A curva nesta gráfica é a **trajetória** percorrida entre os estados inicial e final.
- **O trabalho realizado em um gás em um processo quase estático que leva o gás de um estado inicial para um estado final é o negativo da área sob a curva em um diagrama PV calculado entre esses estados.**
- Para o processo de compressão de um gás em um cilindro, o trabalho realizado depende da trajetória específica percorrida entre o estado inicial e o estado final.



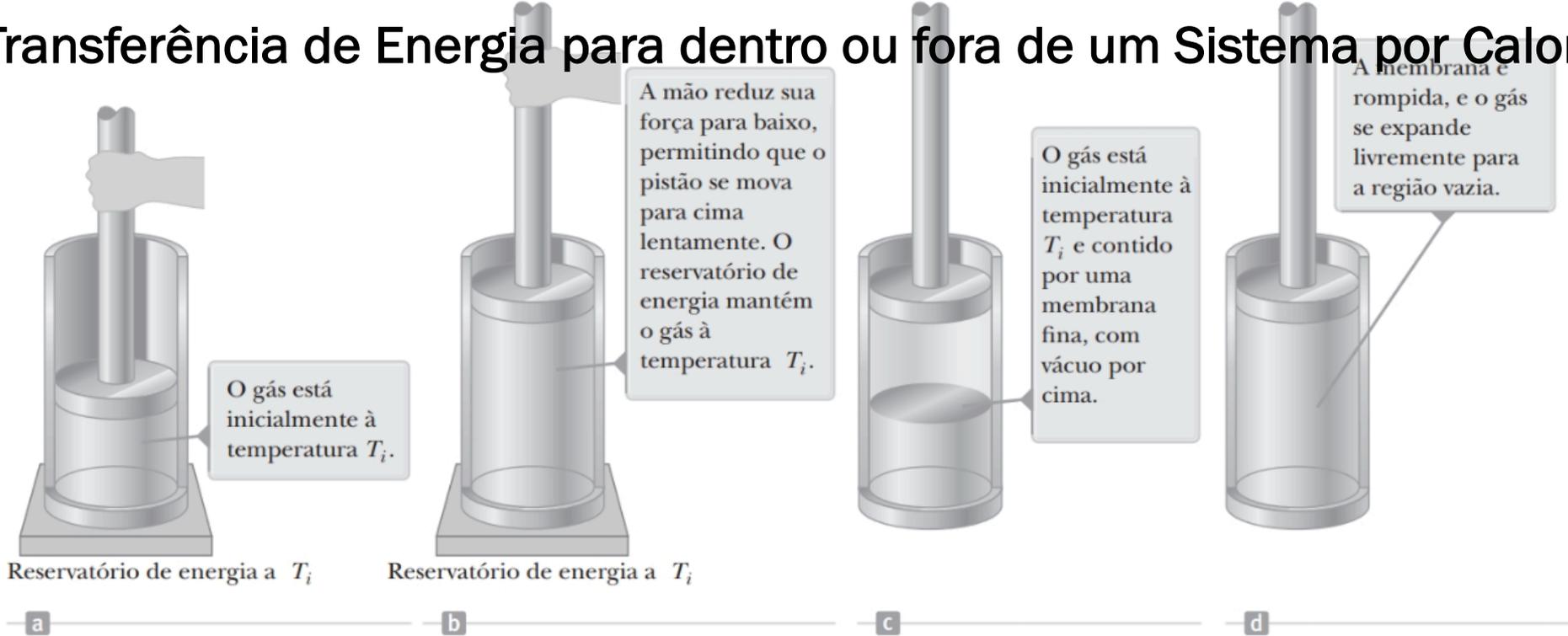
$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

## Trabalho Feito no Gás



- Figura à Esquerda: o volume do gás é primeiro reduzido de  $V_i$  até  $V_f$  na constante  $P_i$  e, a pressão do gás então aumenta de  $P_i$  até  $P_f$  a constante  $V_f$ 
  - Trabalho feito no gás ao longo dessa trajetória =  $-P_i (V_f - V_i)$
- Figura do Meio: a pressão do gás é aumentada de  $P_i$  para  $P_f$  no constante  $V_i$  e, em seguida, o volume do gás é reduzido de  $V_i$  para  $V_f$  na constante  $P_f$ 
  - Trabalho realizado no gás =  $-P_f (V_f - V_i)$
- Figura à Direita:  $P$  e  $V$  mudam continuamente, o trabalho realizado no gás tem um valor entre aqueles obtidos nos dois processos acima.

# Transferência de Energia para dentro ou fora de um Sistema por Calor



- O gás é isolado termicamente de seu entorno, exceto no fundo, onde está em contato térmico com um reservatório de energia. O pistão é mantido em sua posição inicial.
- Força que segura o pistão é ligeiramente reduzida  $\rightarrow$  Pistão sobe lentamente para cima  $\rightarrow$  Gás está trabalhando no pistão. Durante essa expansão até  $V_f$ , energia suficiente é transferida pelo calor do reservatório para o gás para manter uma constante  $T_i$
- O gás está contido por uma membrana fina, com um vácuo acima dela.
- Quando a membrana se rompe, o gás se expande rapidamente no vácuo até  $V_f$ , e a pressão  $P_f$ . Mas o gás não realiza trabalho, porque nenhuma força é necessária para expandir no vácuo. E não há transferência de calor pela parede isolada.

# 3.5 – A Primeira Lei da Termodinâmica



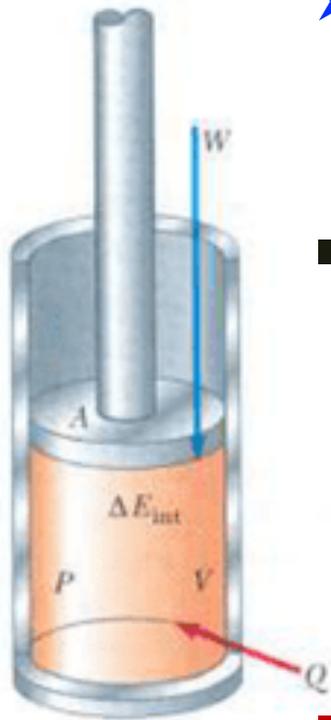
- Um caso especial da equação de conservação de energia.
  - Única variação na energia de Sistema: **Energia Interna =  $E_{\text{int}}$**
  - Únicas variáveis de transferência: **Calor =  $Q$  , Trabalho =  $W$**

## ❖ Primeira Lei da Termodinâmica :

$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$$

- → A variação na energia interna de um sistema é igual à soma da energia transferida nas fronteiras do sistema por calor e trabalho.

# A Primeira Lei da Termodinâmica



- A figura mostra a transferência de energia (pelo  $Q$  e  $W$ ) e a variação da energia interna para um gás em um cilindro consistente com a Primeira Lei da Termodinâmica.
- Quando um sistema tem uma variação infinitesimal em seu estado
  - Pequena quantidade de energia =  $dQ$  é transferida por calor,
  - Pequena quantidade de trabalho =  $dW$  é feita no sistema.
  - Energia interna muda por uma pequena quantidade =  $dE_{int}$

■ Para processos infinitesimais, a Primeira Lei da Termodinâmica:

$$dE_{int} = dQ + dW$$

- $Q$  e  $W$  não são propriedades de um sistema, eles estão relacionados a variações na energia interna de um sistema através da Primeira Lei da Termodinâmica.

# 3.6 – Aplicações da Primeira Lei da Termodinâmica

## Processo Adiabático

- Nenhuma energia entra ou sai do sistema na forma de calor.
  - Todas as superfícies do pistão são isolantes perfeitos.

- Aplicando a Primeira Lei:

$$Q=0, \quad \rightarrow \Delta E_{\text{int}} = W$$

- Compressão adiabática do gás:

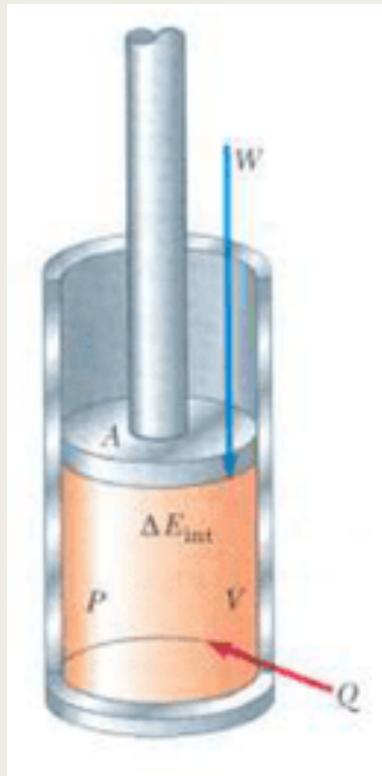
- $W, \Delta E_{\text{int}} \rightarrow$  Positivos.
- O trabalho é realizado sobre o gás, a energia interna do gás aumenta.

- Expansão adiabática do gás:

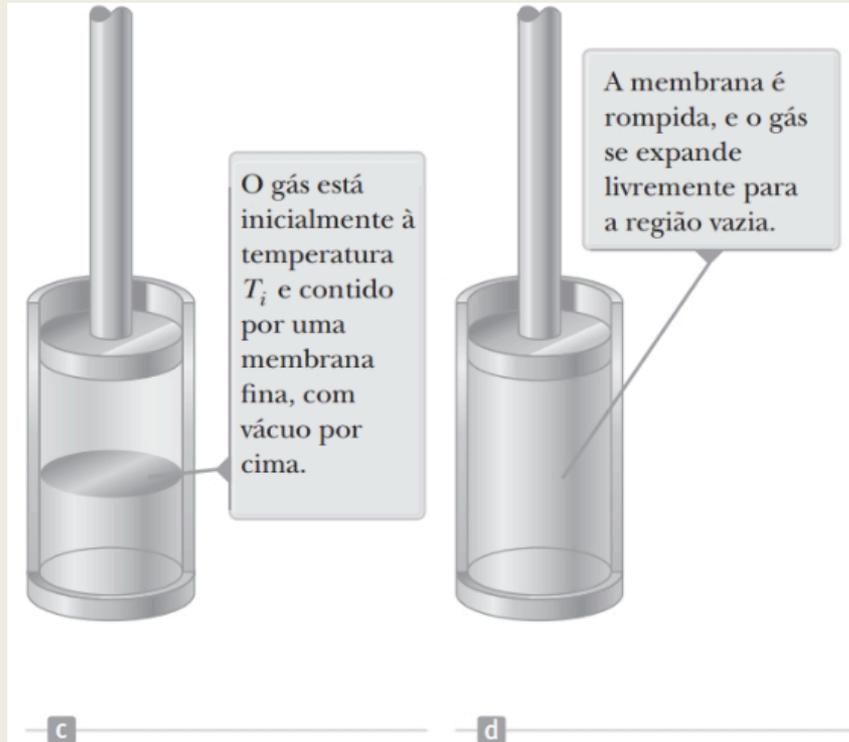
- $W, \Delta E_{\text{int}} \rightarrow$  Negativos.

- Exemplos de processos adiabáticos:

- Expansão de gases quentes em um motor de combustão interna.
- Liquefação de gases em um sistema de resfriamento.
- Ligar um motor a diesel.



# Expansão Livre como um Processo Adiabático



- Nenhum trabalho é feito no gás.

$$Q=0, W=0. \rightarrow \Delta E_{\text{int}}=0$$

- As Energias Internas inicial e final do gás permanecem as mesmas.
- Energia interna de um gás ideal depende apenas de sua temperatura.

- Não esperamos nenhuma variação de temperatura durante uma expansão livre adiabática de um gás ideal.
  - De acordo com experimentos dos gases reais realizados em baixas pressões.
- Experimentos com gases reais em altas pressões mostram um ligeiro aumento ou diminuição na temperatura, após a expansão devido às interações entre as moléculas.

# Processo Isobárico

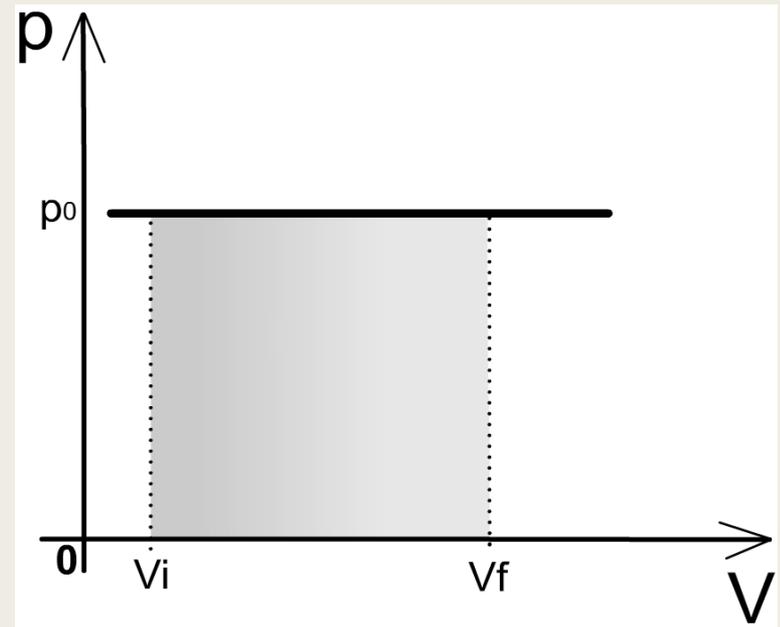
- Processo que ocorre sob pressão constante.
- Na Figura, se o pistão está perfeitamente livre para se mover, a pressão do gás dentro do cilindro é devida à pressão atmosférica e ao peso do pistão.
  - O pistão pode ser modelado como uma partícula de equilíbrio.
- O trabalho feito no gás = negativa da pressão multiplicada pela mudança no volume:



$$W = - \int P dV = -P (V_f - V_i)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$$

- ✓ Em um diagrama PV, um processo isobárico aparece como uma linha horizontal →



# Processo Isovolumétrico

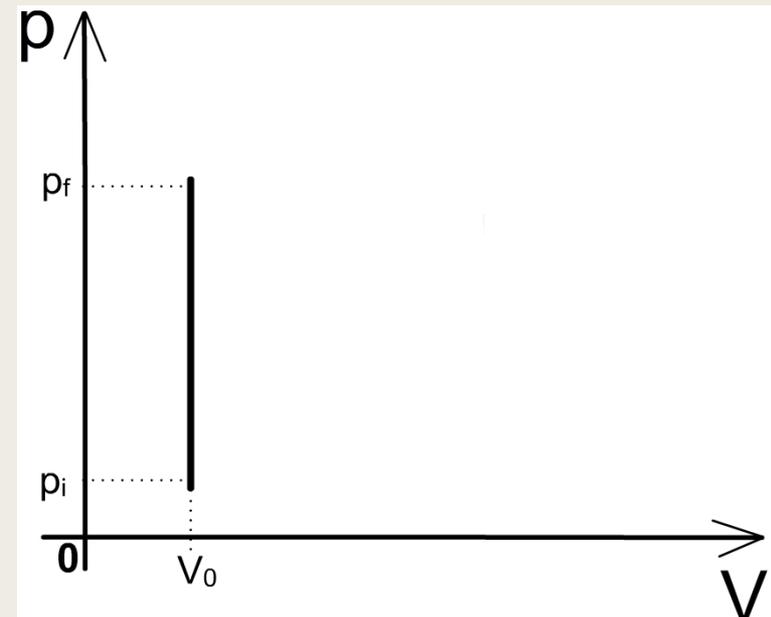
- Processo que ocorre em um volume constante.
- Na Figura, quando o pistão é mantido em uma posição fixa, ocorre um processo isovolumétrico.
  - *Trabalho realizado = 0, pois o volume não muda.*
- Aplicando a Primeira Lei:

$$W=0, \rightarrow \Delta E_{\text{int}} = Q$$

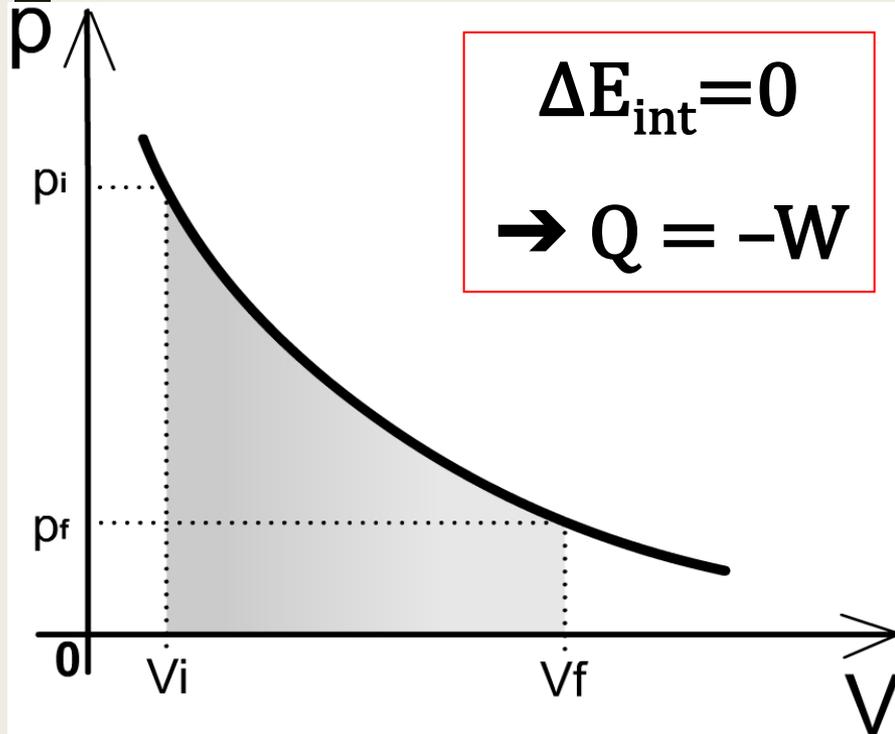


- Se a energia é adicionada pelo calor a um sistema mantido em um volume constante:
  - Toda a energia vai para aumentar a energia interna do sistema,
  - Nenhuma energia entra ou sai do sistema pelo trabalho.

- ✓ Em um diagrama PV, um processo isovolumétrico aparece como uma linha vertical  $\rightarrow$



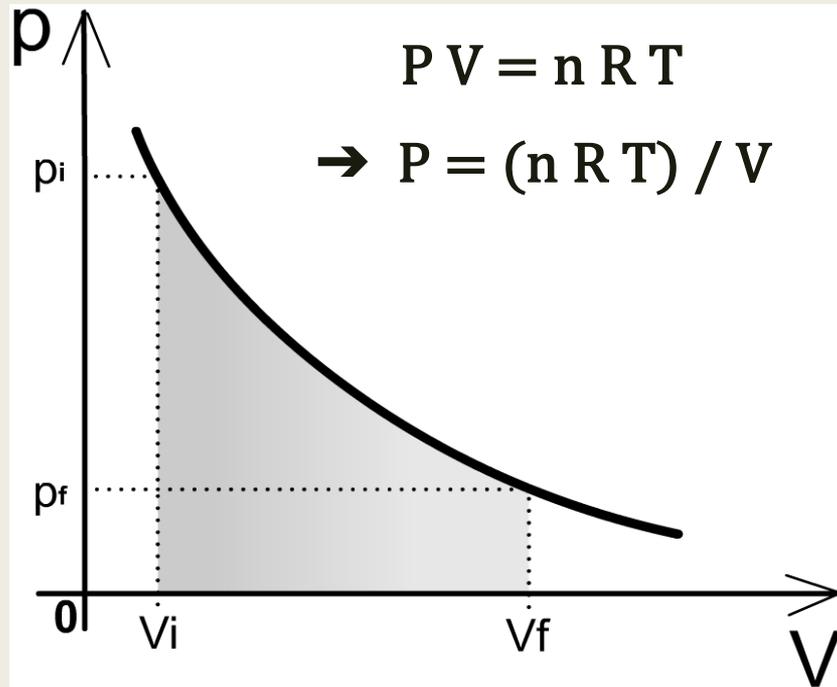
# Processo Isotérmico



- Processo que ocorre a uma temperatura constante.
- Aplicando a Primeira Lei:
  - Energia interna do gás ideal permanece fixa.
    - Energia interna é função apenas da temperatura,
    - Qualquer energia que entra no gás pelo trabalho sai do gás pelo calor, e vice-versa.

- Em diagrama PV, o processo isotérmico aparece como uma linha curva.
  - A trajetória do processo isotérmico segue a curva preta (uma Isotérmica)
- **Isotérmica = a curva que passa por todos os pontos no diagrama PV para os quais o gás tem a mesma temperatura.**

# Trabalho feito no gás em um Processo Isotérmico



❖ Trabalho realizado no gás ideal :

- $n$  = Número de mols.
- $R$  = Constante Universal dos gases.

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} \left( \frac{n R T}{V} \right) dV$$

∴  $T$  = constante,

$$W = -n R T \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V}$$

$$W = -n R T (\ln V_f - \ln V_i)$$

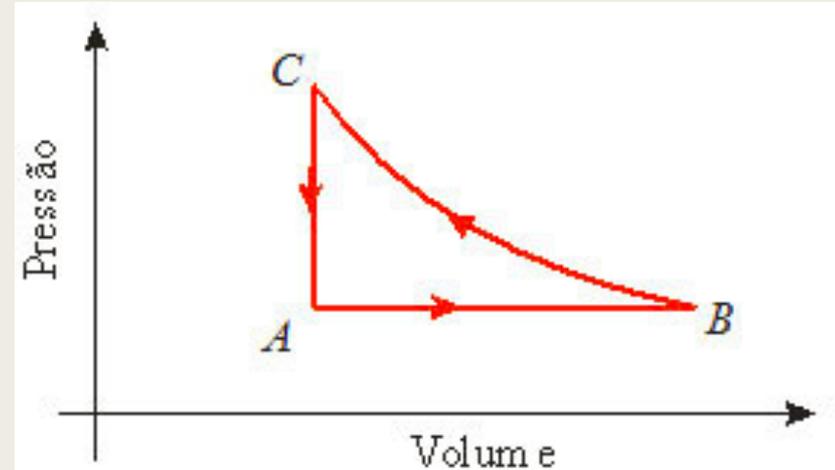
$$W = \int dW = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

$$W = -n R T \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

# Processo Cíclico

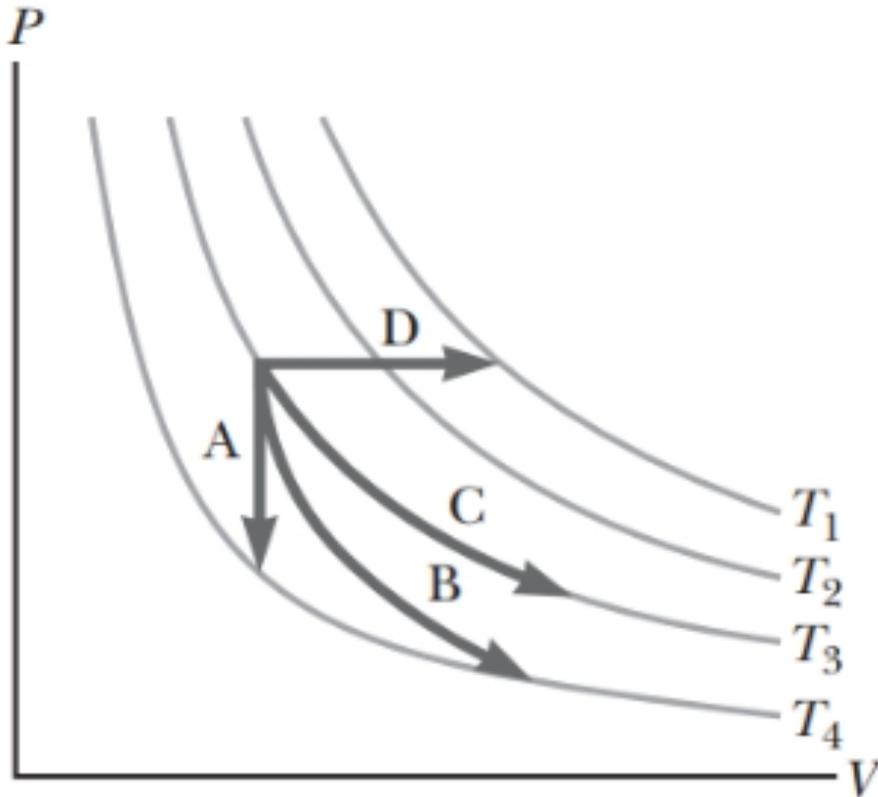
- Processo que se origina e termina no mesmo estado.
- Energia interna é uma variável de estado, e os estados inicial e final são idênticos.
  - Variação da energia interna = 0
- Aplicando a Primeira Lei:

$$\Delta E_{\text{int}} = 0, \quad \rightarrow Q = -W$$



- A energia adicionada pelo calor ao sistema deve, portanto, ser igual ao negativo do trabalho realizado no sistema durante o ciclo.
- O trabalho resultante executado por ciclo é igual à área circunscrita pela trajetória que representa o processo em um diagrama PV.
  - Na figura aqui : Trabalho realizado = Área do Triângulo Vermelho.

# Exercício



**Figura 17.10** (Teste Rápido 17.5)  
Identifique a natureza das trajetórias A, B, C e D.

- Que tipo de processos termodinâmicos são mostrados na figura pelas trajetórias A, B, C, D?
- ✓ D = Processo Isobárico
- ✓ A = Processo Isovolumétrico
- ✓ C = Processo Isotérmico
- ✓ B = Processo Adiabático
  - Quando o processo vai de um estado  $[P_1, V_1, T_1]$  para um estado diferente  $[P_2, V_2, T_2]$