

## A.03.01 – Trabalho de Fronteira (Sistemas Fechados)

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



<https://github.com/CNThermSci/ApplThermSci>

Compiled on 2020-09-10 20h48m57s UTC

# Sumário da Parte I

## 1 Apresentação do Trabalho de Fronteira

- Definição
- Aplicações

## 2 Tópicos de Leitura

# Sumário da Parte II

## 5 Quantificação do Trabalho de Fronteira

- Trabalho de Fronteira De Processo
- Trabalho de Fronteira de Ciclo

## + Tópicos de Leitura

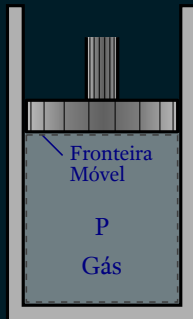
# Parte I

## Apresentação do Trabalho de Fronteira

# Trabalho de Fronteira – Definição

Trabalho de fronteira,  $W_f$  (kJ)

- É a **interação energética**
- de um **sistema compressível**
- capaz de **diretamente** realizar
- **trabalho mecânico**
- por meio de uma **fronteira móvel**.



# Trabalho de Fronteira – Aplicações

Aplicações incluem:

- Motores de combustão interna
- Motores **Stirling**



Image by Schlaich Bergemann und Partner from wikipedia.org

# Trabalho de Fronteira – Aplicações

Aplicações incluem:

- Compressores alternativos
- Motores **lineares**

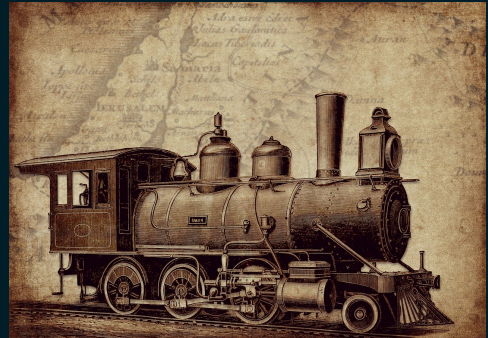


Image by DarkWorkX from pixabay.com

# Trabalho de Fronteira – Aplicações

Aplicações incluem:

- Elevadores de carga e atuadores
- Expansores **criogênicos**

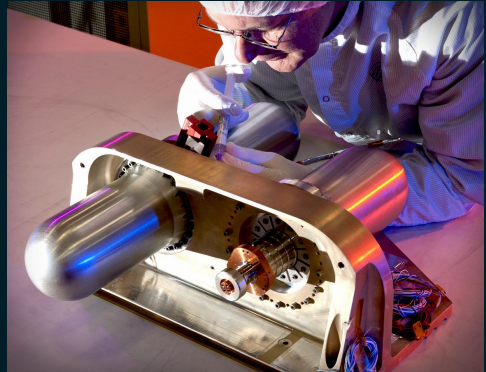


Image by NASA Goddard Space Flight Center from flickr.com



# Tópicos de Leitura I



Çengel, Y. A. e Boles, M. A.

*Termodinâmica 7ª Edição. Seção 4-1.*

AMGH. Porto Alegre. ISBN 978-85-8055-200-3.



Photo by Nick Bondarev from Pexels

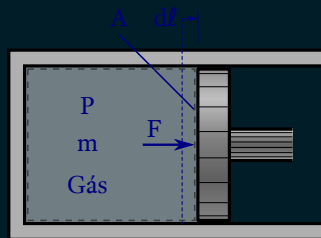
## Parte II

# Quantificação do Trabalho de Fronteira

## Trabalho de Fronteira – Diferencial

$$\delta W_f \equiv \vec{F} \cdot d\vec{\ell}$$

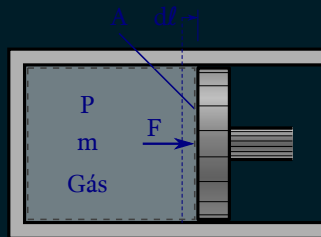
$W_f > 0$  quando o **sistema executa** trabalho



## Trabalho de Fronteira – Diferencial

$$\delta W_f \equiv (|\vec{F}| \cdot |d\vec{\ell}|) \times \frac{A}{A} \rightarrow$$

$W_f > 0$  quando o **sistema executa** trabalho

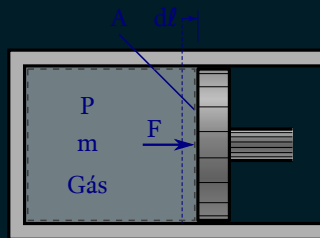


## Trabalho de Fronteira – Diferencial

$$\delta W_f \equiv (|\vec{F}| \cdot |d\vec{\ell}|) \times \frac{A}{A} \rightarrow$$

$$\delta W_f = \frac{F}{A} \cdot A d\ell \rightarrow$$

$W_f > 0$  quando o **sistema executa** trabalho



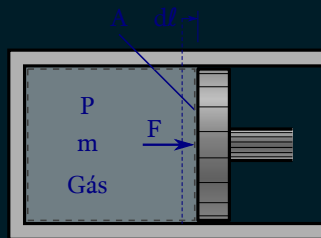
## Trabalho de Fronteira – Diferencial

$$\delta W_f \equiv (|\vec{F}| \cdot |d\vec{\ell}|) \times \frac{A}{A} \rightarrow$$

$$\delta W_f = \frac{F}{A} \cdot A d\ell \rightarrow$$

$$\left( \frac{F}{A} \equiv P, \quad A d\ell \equiv dV \right) \rightarrow$$

$W_f > 0$  quando o **sistema executa** trabalho



## Trabalho de Fronteira – Diferencial

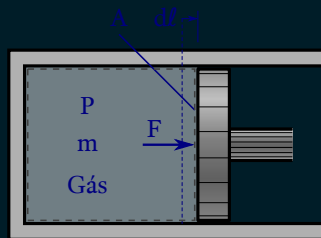
$$\delta W_f \equiv (|\vec{F}| \cdot |d\vec{\ell}|) \times \frac{A}{A} \rightarrow$$

$$\delta W_f = \frac{F}{A} \cdot A d\ell \rightarrow$$

$$\left( \frac{F}{A} \equiv P, \quad A d\ell \equiv dV \right) \rightarrow$$

$$\delta W_f = P dV$$

$W_f > 0$  quando o **sistema executa** trabalho





## Trabalho de Fronteira – Diferencial

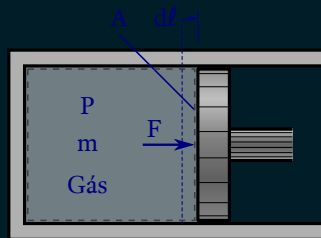
$$\delta W_f \equiv (|\vec{F}| \cdot |d\vec{\ell}|) \times \frac{A}{A} \rightarrow$$

$$\delta W_f = \frac{F}{A} \cdot A d\ell \rightarrow$$

$$\left( \frac{F}{A} \equiv P, \quad A d\ell \equiv dV \right) \rightarrow$$

$$(\delta W_f = P dV) / m \rightarrow$$

$W_f > 0$  quando o **sistema executa** trabalho



## Trabalho de Fronteira – Diferencial

$$\delta W_f \equiv (|\vec{F}| \cdot |d\vec{\ell}|) \times \frac{A}{A} \rightarrow$$

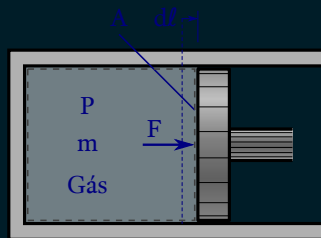
$$\delta W_f = \frac{F}{A} \cdot A d\ell \rightarrow$$

$$\left( \frac{F}{A} \equiv P, \quad A d\ell \equiv dV \right) \rightarrow$$

$$(\delta W_f = P dV) / m \rightarrow$$

$$\delta w_f = P dv$$

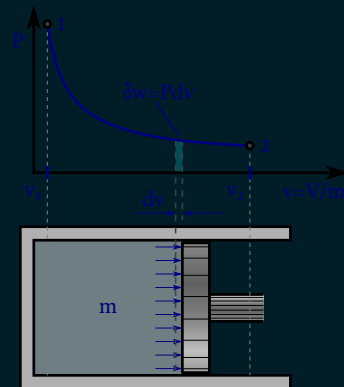
$W_f > 0$  quando o **sistema executa** trabalho



# Trabalho de Fronteira – Processo

Processo de **quase-equilíbrio** 1–2:

$$\delta w_f = P dv$$

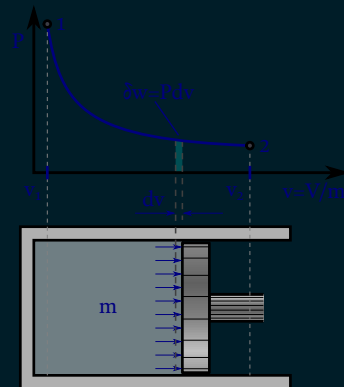


# Trabalho de Fronteira – Processo

Processo de **quase-equilíbrio** 1-2:

$$\delta w_f = P dv$$

$$w_{12} = \int_1^2 \delta w_f = \int_1^2 P dv$$

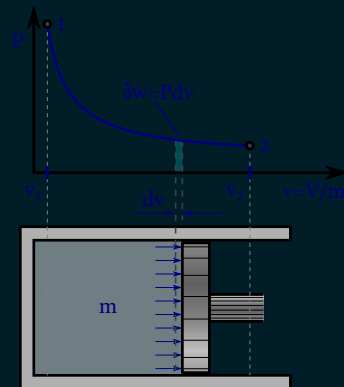


# Trabalho de Fronteira – Processo

Processo de **quase-equilíbrio** 1-2:

$$\delta w_f = P dv$$

$$\left( w_{12} = \int_1^2 \delta w_f = \int_1^2 P dv \right) \times m \rightarrow$$



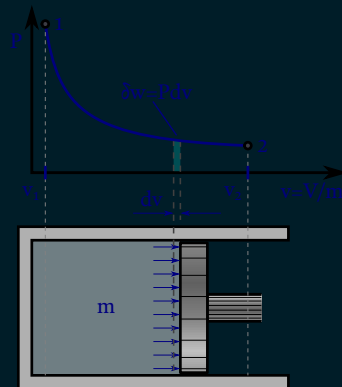
# Trabalho de Fronteira – Processo

Processo de **quase-equilíbrio** 1-2:

$$\delta w_f = P dv$$

$$\left( w_{12} = \int_1^2 \delta w_f = \int_1^2 P dv \right) \times m \rightarrow$$

$$W_{12} = \int_1^2 \delta W_f = \int_1^2 P dV$$



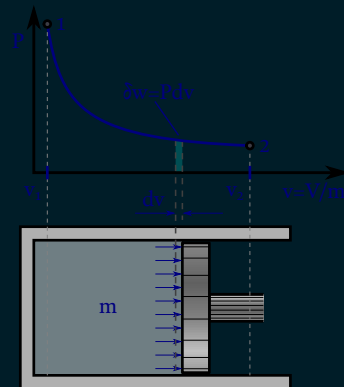
# Trabalho de Fronteira – Processo

Processo de **quase-equilíbrio** 1-2:

$$\delta w_f = P dv$$

$$\left( w_{12} = \int_1^2 \delta w_f = \int_1^2 P dv \right) \times m \rightarrow$$

$$W_{12} = \int_1^2 \delta W_f = \int_1^2 P dV \quad \therefore$$



# Trabalho de Fronteira – Processo

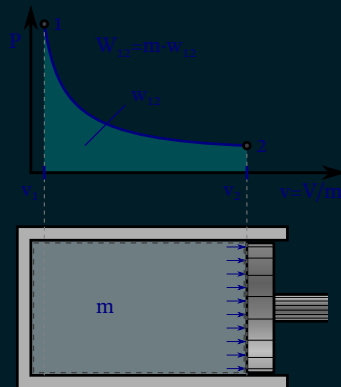
Processo de **quase-equilíbrio** 1-2:

$$\delta w_f = P dv$$

$$\left( w_{12} = \int_1^2 \delta w_f = \int_1^2 P dv \right) \times m \rightarrow$$

$$W_{12} = \int_1^2 \delta W_f = \int_1^2 P dV \quad \therefore$$

$W_f$  é a **área** sob o processo em **coordenadas  $P - V$** .





# Trabalho de Fronteira – Processo

Processo de **quase-equilíbrio** 1-2:

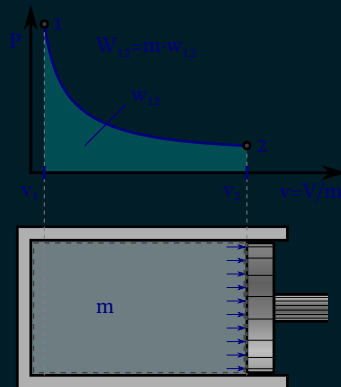
$$\delta w_f = P dv$$

$$\left( w_{12} = \int_1^2 \delta w_f = \int_1^2 P dv \right) \times m \rightarrow$$

$$W_{12} = \int_1^2 \delta W_f = \int_1^2 P dV \quad \therefore$$

$W_f$  é a **área** sob o processo em **coordenadas  $P - V$** .

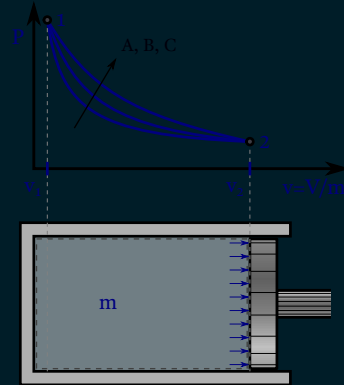
$w_f$  é a **área** sob o processo em **coordenadas  $P - v$** .



# Trabalho de Fronteira – Caminho

Trabalho de fronteira,  $w_f$  ou  $W_f$ :

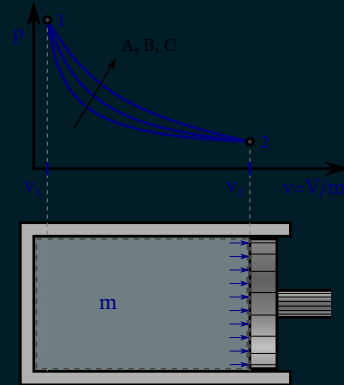
- Depende do **caminho 1-2**



# Trabalho de Fronteira – Caminho

Trabalho de fronteira,  $w_f$  ou  $W_f$ :

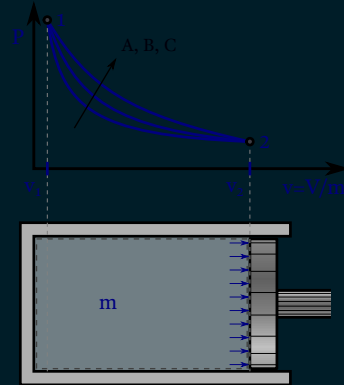
- Depende do **caminho 1–2**
- $\int_1^2 \delta w_f = w_{12}$



# Trabalho de Fronteira – Caminho

Trabalho de fronteira,  $w_f$  ou  $W_f$ :

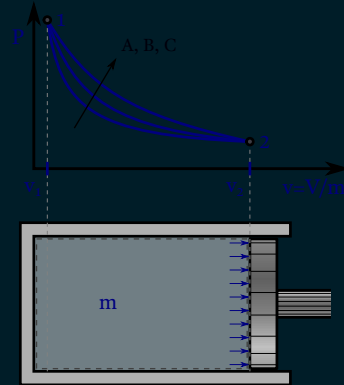
- Depende do **caminho 1-2**
- $\int_1^2 \delta w_f = w_{12} \neq "w_2" - "w_1"$



# Trabalho de Fronteira – Caminho

Trabalho de fronteira,  $w_f$  ou  $W_f$ :

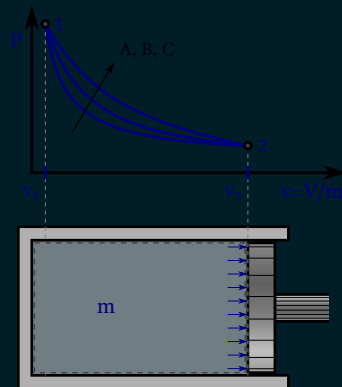
- Depende do **caminho 1–2**
- $\int_1^2 \delta w_f = w_{12} \neq "w_2" - "w_1"$
- A **diferença** entre caminhos é determinada pelas demais interações de energia durante o processo 1–2



# Trabalho de Fronteira – Caminho

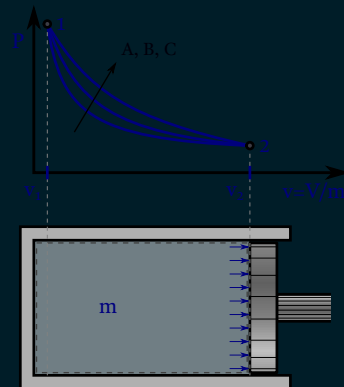
Trabalho de fronteira,  $w_f$  ou  $W_f$ :

- Depende do **caminho 1–2**
- $\int_1^2 \delta w_f = w_{12} \neq "w_2" - "w_1"$
- A **diferença** entre caminhos é determinada pelas demais interações de energia durante o processo 1–2
- Em **sistemas compressíveis simples**, o **calor** é a única outra interação de energia.



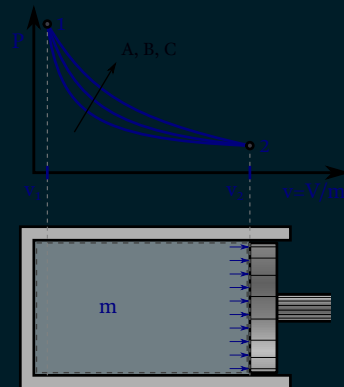
## Trabalho de Fronteira – Ciclo

- A dependência do caminho permite que um sistema executando um vai-vém (**ciclo mecânico**) possa tanto (i) produzir ou (ii) consumir uma quantidade **líquida** de trabalho.



## Trabalho de Fronteira – Ciclo

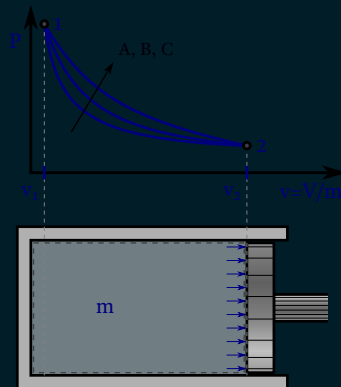
- A dependência do caminho permite que um sistema executando um vai-vém (**ciclo mecânico**) possa tanto (i) produzir ou (ii) consumir uma quantidade **líquida** de trabalho.
- Basta escolher os caminhos de ida e volta no processo termodinâmico.





## Trabalho de Fronteira – Ciclo

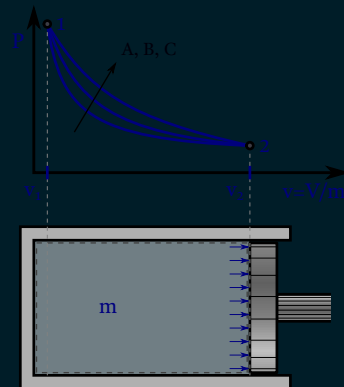
- A dependência do caminho permite que um sistema executando um vai-vém (**ciclo mecânico**) possa tanto (i) produzir ou (ii) consumir uma quantidade **líquida** de trabalho.
- Basta escolher os caminhos de ida e volta no processo termodinâmico.
- Se os **estados** periodicamente visitados pelo sistema forem **os mesmos**, o sistema estará executando um **ciclo termodinâmico**.



## Trabalho de Fronteira – Ciclo

Ciclo 1–2 via ‘C’ e 2–1 via ‘A’:

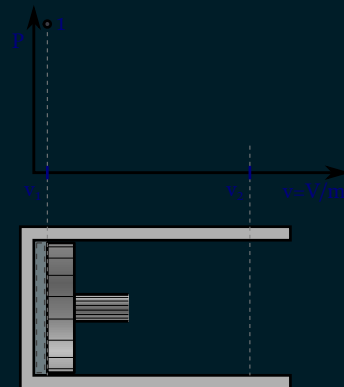
- Ciclo **motor**, que **produz**  $W_{liq}$



## Trabalho de Fronteira – Ciclo

Ciclo 1–2 via ‘C’ e 2–1 via ‘A’:

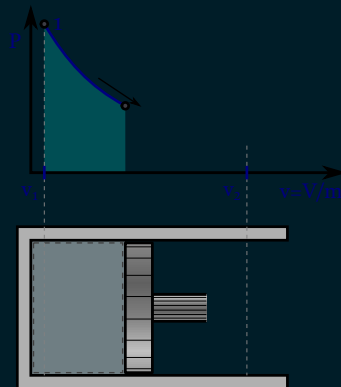
- Ciclo **motor**, que **produz**  $W_{liq}$
- $W_{acum}$  mostrado sob os processos



## Trabalho de Fronteira – Ciclo

Ciclo 1–2 via ‘C’ e 2–1 via ‘A’:

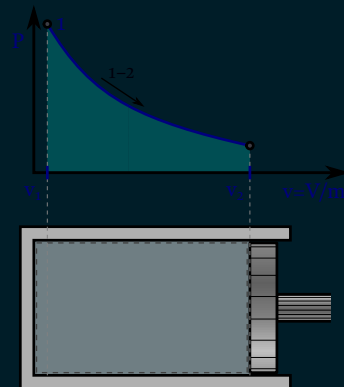
- Ciclo **motor**, que **produz**  $W_{liq}$
- $W_{acum}$  mostrado sob os processos
- Exp. 1–2 **produz** trabalho  $W_{12} > 0$



## Trabalho de Fronteira – Ciclo

Ciclo 1–2 via ‘C’ e 2–1 via ‘A’:

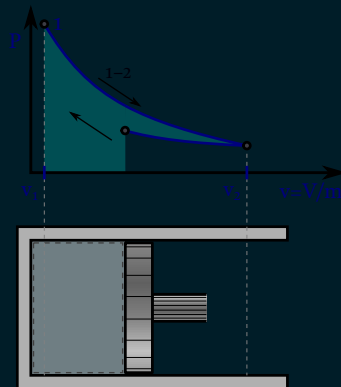
- Ciclo **motor**, que **produz**  $W_{liq}$
- $W_{acum}$  mostrado sob os processos
- Exp. 1–2 **produz** trabalho  $W_{12} > 0$
- Retorno ao estado 1 requer **consumo** de trabalho



## Trabalho de Fronteira – Ciclo

Ciclo 1–2 via ‘C’ e 2–1 via ‘A’:

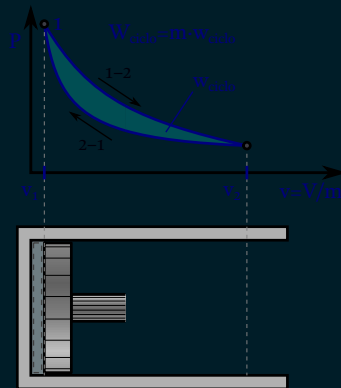
- Ciclo **motor**, que **produz**  $W_{liq}$
- $W_{acum}$  mostrado sob os processos
- Exp. 1–2 **produz** trabalho  $W_{12} > 0$
- Retorno ao estado 1 requer **consumo** de trabalho
- Compr. 2–1 **produz** trabalho  $W_{21} < 0$



## Trabalho de Fronteira – Ciclo

Ciclo 1–2 via ‘C’ e 2–1 via ‘A’:

- Ciclo **motor**, que **produz**  $W_{liq}$
- $W_{acum}$  mostrado sob os processos
- Exp. 1–2 **produz** trabalho  $W_{12} > 0$
- Retorno ao estado 1 requer **consumo** de trabalho
- Compr. 2–1 **produz** trabalho  $W_{21} < 0$
- $W_{ciclo} = (W_{12} + W_{21}) > 0$  é igual à **área do ciclo** em **coordenadas  $P - V$** .



# Tópicos de Leitura I



Çengel, Y. A. e Boles, M. A.

*Termodinâmica 7ª Edição. Seção 4-1.*

AMGH. Porto Alegre. ISBN 978-85-8055-200-3.





Photo by Alexander Tiupa from Pexels