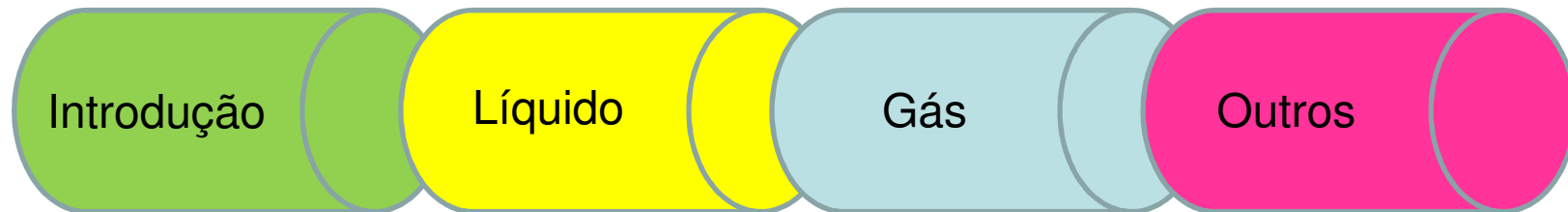


# Modelos de Fonte



*Versão: Abril de 2017*

**Consequências**

**Modelo de Fonte**

Modelo de Dispersão

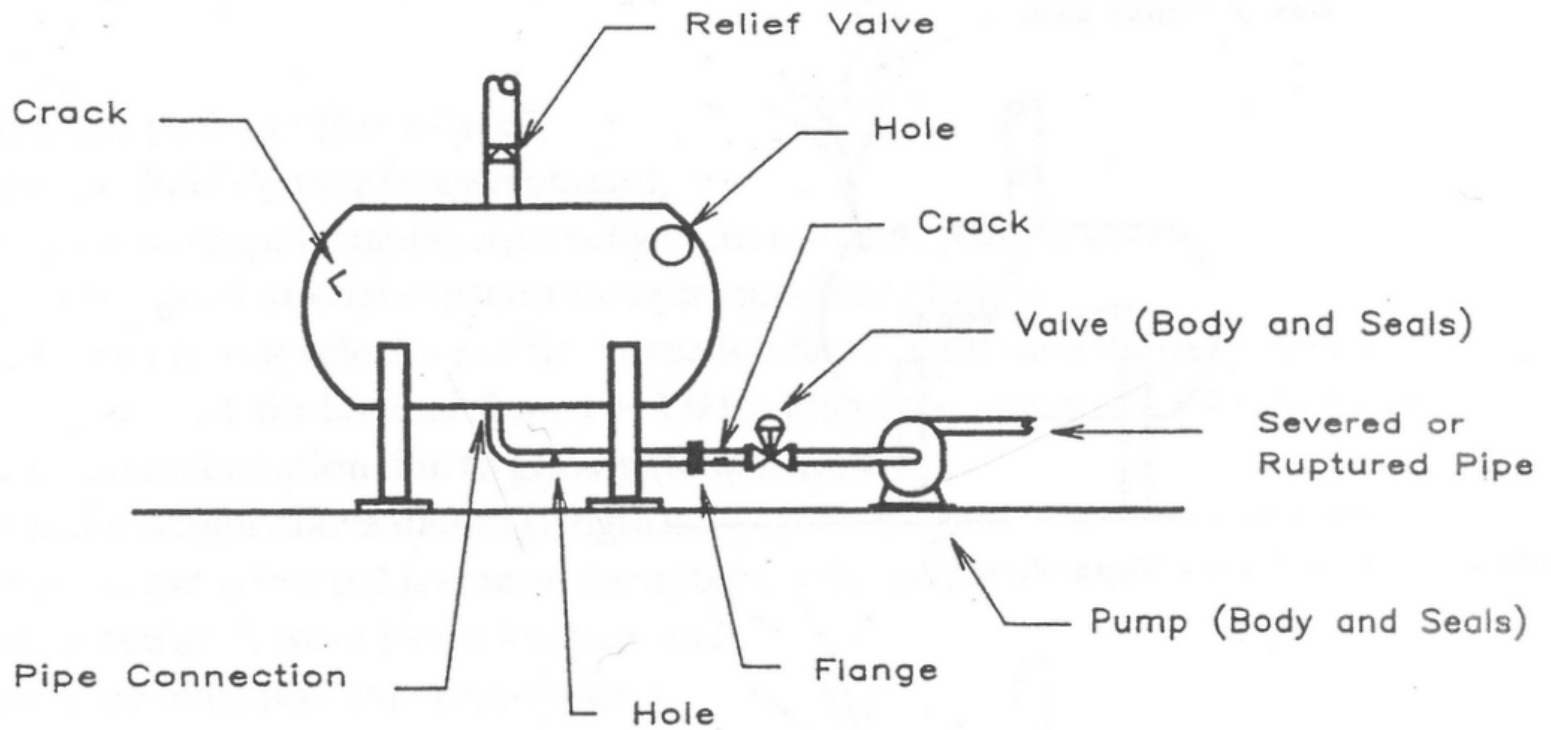
Modelos de Efeito

Toxicologia

Modelo de Incêndio  
e Explosão



# Modelos de Fonte



# Modelos de Fonte

Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)

*Vazão de líquido através de tubos\* (aplicação para rompimento total)*

Vazão de gás através de um furo

*Vazão de gás através de um tubo\* (aplicação para rompimento total de duto)*

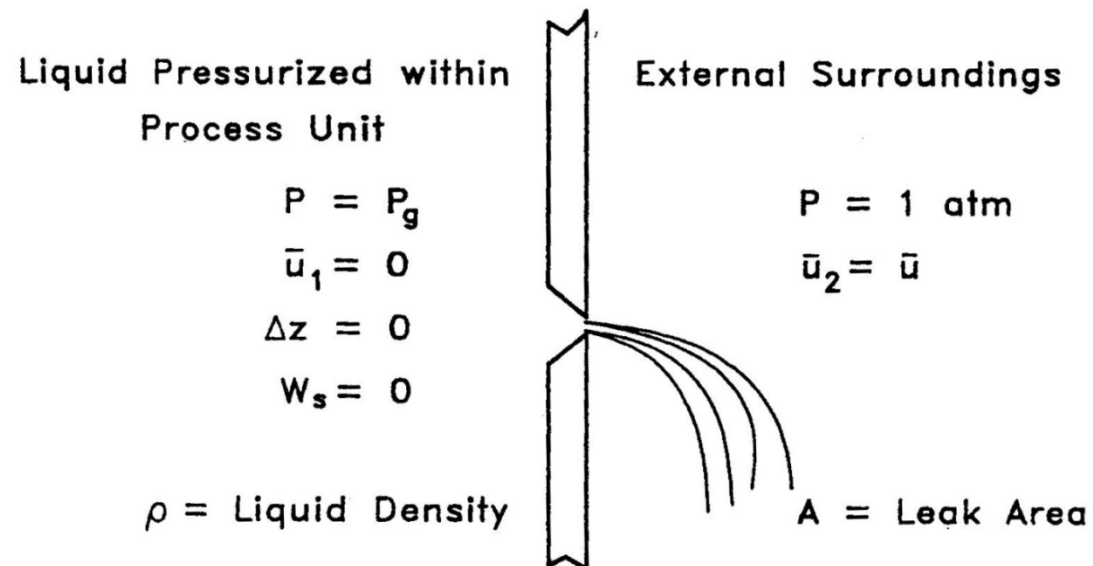
Flashing Liquids

Piscina

\* Abordado na disciplina de Mecânica dos Fluidos

# Modelos de Fonte

## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)



Furo pequeno

Líquido incompressível, densidade constante

Pressão é convertida em energia cinética quando o fluido escapa

Parte da energia cinética é perdida no atrito com as bordas do furo

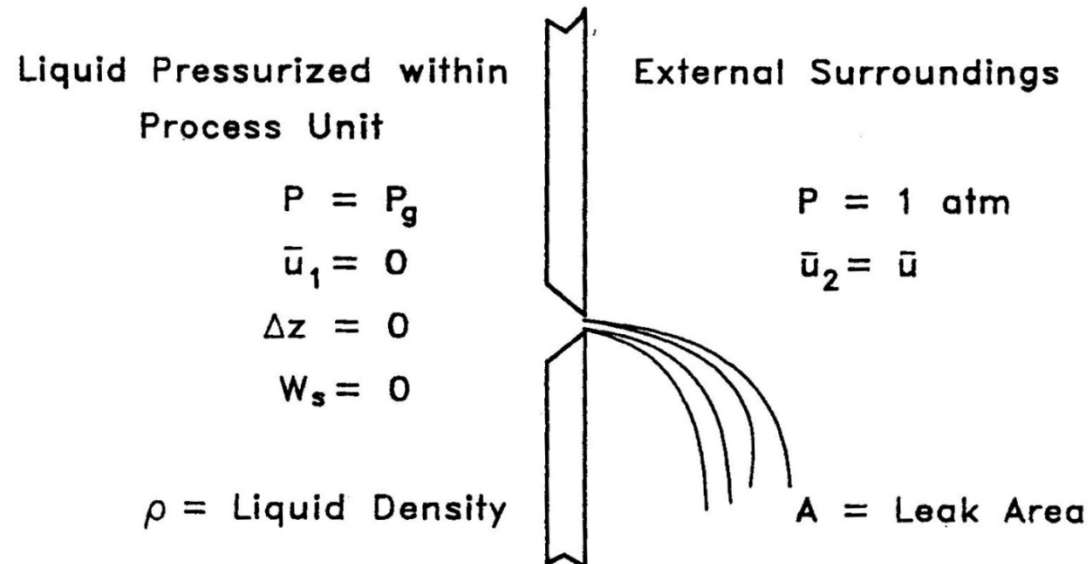
Pressão no interior do processo é constante (furo pequeno)

Trabalho: nulo

Cota vertical de líquido: nula

# Modelos de Fonte

## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)



Se,

Pressão externa: pressão atmosférica

Então,

$$\Delta P = P_g$$

$P_g$ : pressão manométrica

A pressão manométrica é a medição da pressão em relação à pressão atmosférica existente no local. Logo, é uma pressão relativa.

## Pressão Manométrica (psig) vs Absoluta (psia)

**psig**: abreviação de *pounds per square inch gauge* – libras por polegada quadrada manométrica.

A pressão manométrica sempre ignora a pressão atmosférica

**psia**: abreviação para *pounds per square inch absolute* – libras por polegada quadrada absoluta (inclui a pressão atmosférica).

$$\text{psia} = \text{psig} + 14,696$$

$$\text{psig} = \text{psia} - 14,696$$

## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

Balanco de energia geral associado ao fluido escoando:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = - \frac{W_s}{\dot{m}}$$

$P$  is the pressure (force/area),

$\rho$  is the fluid density (mass/volume),

$\bar{u}$  is the average instantaneous velocity of the fluid (length/time),

$g_c$  is the gravitational constant (length mass/force time<sup>2</sup>),

$\alpha$  is the unitless velocity profile correction factor with the following values:

$\alpha = 0.5$  for laminar flow,  $\alpha = 1.0$  for plug flow, and  $\alpha \rightarrow 1.0$  for turbulent flow,



## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

Balanco de energia geral associado ao fluido escoando:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = -\frac{W_s}{\dot{m}}$$

$g$  is the acceleration due to gravity (length/time<sup>2</sup>),

$z$  is the height above datum (length),

$F$  is the net frictional loss term (length force/mass),

$W_s$  is the shaft work (force length), and

$\dot{m}$  is the mass flow rate (mass/time).

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = - \frac{W_s}{\dot{m}}$$

Representa a final menos a inicial.

Perda por atrito

$$\int \frac{dP}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho}$$

Fluido Incompressível (densidade constante)

Re-escrevendo usando uma constante (coeficiente de descarga):

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - F = C_1^2 \left( -\frac{\Delta P}{\rho} \right)$$



$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = -\frac{W_s}{\dot{m}}$$

Representa a final menos a inicial.

Perda por atrito

$$\int \frac{dP}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho}$$

Fluido Incompressível (densidade constante)

Re-escrevendo usando uma constante (coeficiente de descarga):

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - F = C_1^2 \left( -\frac{\Delta P}{\rho} \right)$$



Assim...

$$\bar{u} = C_1 \sqrt{\alpha} \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho}}$$

Criando uma nova constante:

$$C_o = C_1 \sqrt{\alpha}$$

Finalmente:

**Velocidade de saída do fluido:**

$$\bar{u} = C_o \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho}}$$

Onde:

$C_o$  : coeficiente de atrito

$g_c$  : constante gravitacional

$\rho$  : densidade do fluido

$P_g$  : pressão do líquido no eq.

$$\bar{u} = C_o \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho}}$$

### Valores para o coeficiente de atrito $C_o$ :

- For sharp-edged orifices and for Reynolds numbers greater than 30,000,  $C_o$  approaches the value 0.61. For these conditions the exit velocity of the fluid is independent of the size of the hole.
- For a well-rounded nozzle the discharge coefficient approaches 1.
- For short sections of pipe attached to a vessel (with a length-diameter ratio not less than 3), the discharge coefficient is approximately 0.81.
- When the discharge coefficient is unknown or uncertain, use a value of 1.0 to maximize the computed flows.

# Modelos de Fonte

## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

Velocidade de saída do fluido:

$$\bar{u} = C_o \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho}}$$

Vazão mássica de saída:

$$Q_m = \rho \bar{u} A = A C_o \sqrt{2\rho g_c P_g}$$

Onde:

A : área do furo

Área do Circulo:  $A = \pi r^2$



## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

### Exemplo:

At 1 P.M. the plant operator notices a drop in pressure in a pipeline transporting benzene. The pressure is immediately restored to 100 psig. At 2:30 P.M. a 1/4-in-diameter leak is found in the pipeline and immediately repaired. Estimate the total amount of benzene spilled. The specific gravity of benzene is 0.8794.



## Observação:

### Densidade Relativa

#### Relative density or specific gravity:

is the ratio of the density (mass of a unit volume) of a substance to the density of a given reference material. Specific gravity usually means relative density with respect to water.

The term "relative density" is often preferred in modern scientific usage.

Water density:  $0.999972 \text{ g/cm}^3$  (or  $62.43 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}^{-3}$ ).

---

#### Observação:

#### Como obter a densidade relativa do líquido?

[http://www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/produtos/produto\\_consulta\\_completa.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/produtos/produto_consulta_completa.asp)





## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

At 1 P.M. the plant operator notices a drop in pressure in a pipeline transporting benzene. The pressure is immediately restored to 100 psig. At 2:30 P.M. a 1/4-in-diameter leak is found in the pipeline and immediately repaired. Estimate the total amount of benzene spilled. The specific gravity of benzene is 0.8794.

- 1) Converter o diâmetro de in para ft
- 2) Calcular a área em pés quadrados



## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

At 1 P.M. the plant operator notices a drop in pressure in a pipeline transporting benzene. The pressure is immediately restored to 100 psig. At 2:30 P.M. a 1/4-in-diameter leak is found in the pipeline and immediately repaired. Estimate the total amount of benzene spilled. The specific gravity of benzene is 0.8794.

- 3) Calcular a densidade do benzeno em libra massa por pé cúbico
- 4) Assumir  $C_o$  igual a 0.61 (???)
- 5)  $g_c$  (gravitational constant) = 32.17 ft-lbm/lbf-seg<sup>2</sup>
- 6) Converter de psig para lbf/ft<sup>2</sup>

**Note: psig = lbf/in<sup>2</sup>**



## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

At 1 P.M. the plant operator notices a drop in pressure in a pipeline transporting benzene. The pressure is immediately restored to 100 psig. At 2:30 P.M. a 1/4-in-diameter leak is found in the pipeline and immediately repaired. Estimate the total amount of benzene spilled. The specific gravity of benzene is 0.8794.

- 7) Aplicar a fórmula de vazão
- 8) Calcular a quantidade vazada em 90 minutos



## Vazão de líquido através de um furo (modelo simplificado)

### Solution

The drop in pressure observed at 1 P.M. is indicative of a leak in the pipeline. The leak is assumed to be active between 1 P.M. and 2:30 P.M., a total of 90 minutes. The area of the hole is

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.14)(0.25 \text{ in})^2(1 \text{ ft}^2/144 \text{ in}^2)}{4}$$

$$= 3.41 \times 10^{-4} \text{ ft}^2.$$

The density of the benzene is

$$\rho = (0.8794)(62.4 \text{ lb}_m/\text{ft}^3) = 54.9 \text{ lb}_m/\text{ft}^3.$$

The leak mass flow rate is given by Equation 4-7. A discharge coefficient of 0.61 is assumed for this orifice-type leak:

$$Q_m = AC_o \sqrt{2\rho g_c P_g}$$

$$= (3.41 \times 10^{-4} \text{ ft}^2)(0.61) \sqrt{(2) \left( 54.9 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3} \right) \left( 32.17 \frac{\text{ft lb}_m}{\text{lb}_f \text{ s}^2} \right) \left( 100 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2} \right) \left( 144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2} \right)}$$

$$= 1.48 \text{ lb}_m/\text{s}.$$

The total quantity of benzene spilled is

$$(1.48 \text{ lb}_m/\text{s})(90 \text{ min})(60 \text{ s/min}) = 7990 \text{ lb}_m = 1090 \text{ gal}.$$

psig

Conversão de  
Lbf/in<sup>2</sup> para lbf/ft<sup>2</sup>



$$\text{Area} = 3,41 \cdot 10^{-4} \text{ ft}^2$$

$$\rho = 54,9 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3}$$

$$g_c = 32,17 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}_m}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}$$

$$C_o = 0,61$$

$$P_g = 100 \text{ psig} = 100 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2}$$

$$1,44 \cdot 10^4 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^2}$$

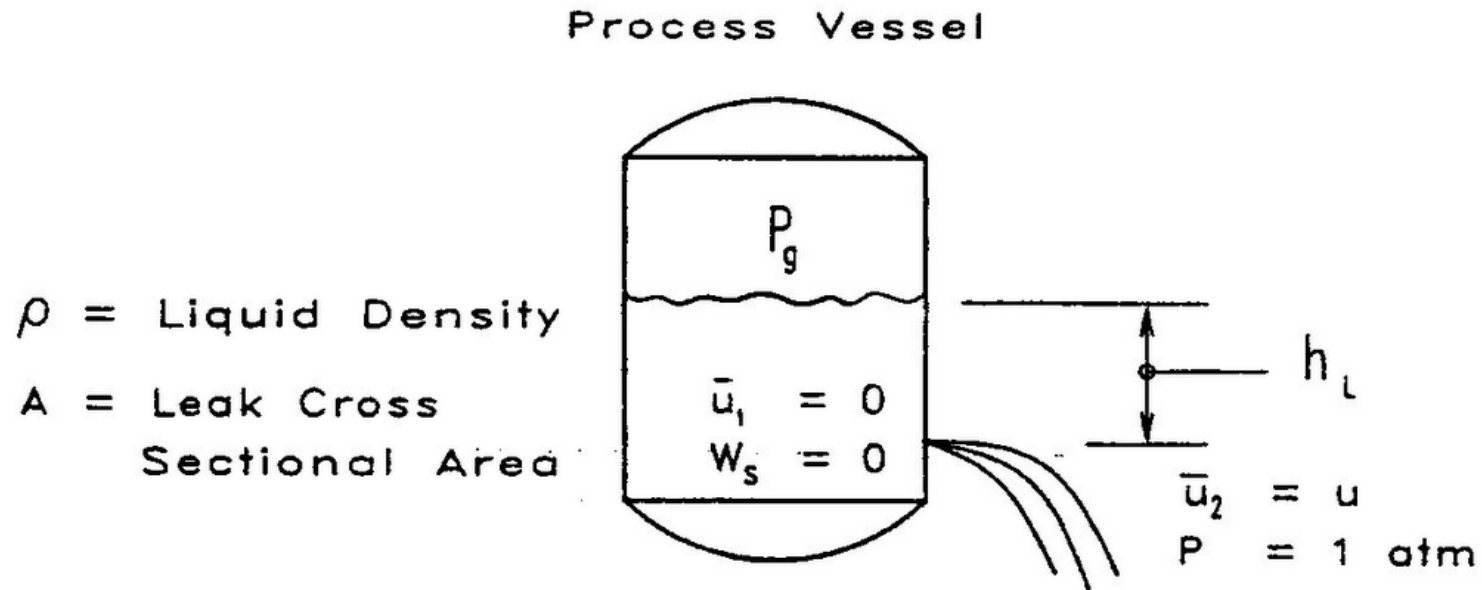
$$Q = A \cdot C_o \cdot \sqrt{2 \rho \cdot g_c \cdot P_g}$$

$$Q = 3,41 \cdot 10^{-4} \text{ ft}^2 \cdot 0,61 \cdot \sqrt{2 \cdot 54,9 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3} \cdot 32,17 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}_m}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2} \cdot 1,44 \cdot 10^4 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^2}}$$

$$Q = 1,48 \text{ lb}_m / \text{s}$$

# Modelos de Fonte

## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)



Líquido incompressível, densidade constante

Furo pequeno

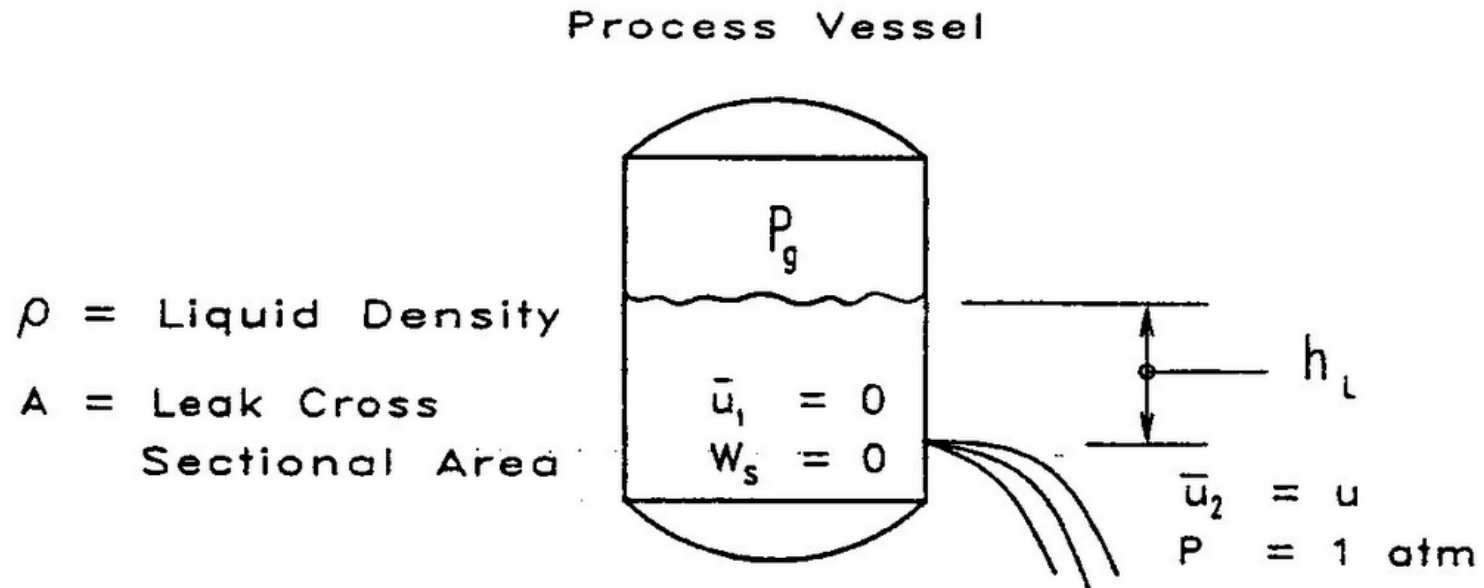
Pressão é convertida em energia cinética quando o fluido escapa

Parte da energia cinética é perdida no atrito com as bordas do furo

Considerar a lamina de fluido acima do furo

# Modelos de Fonte

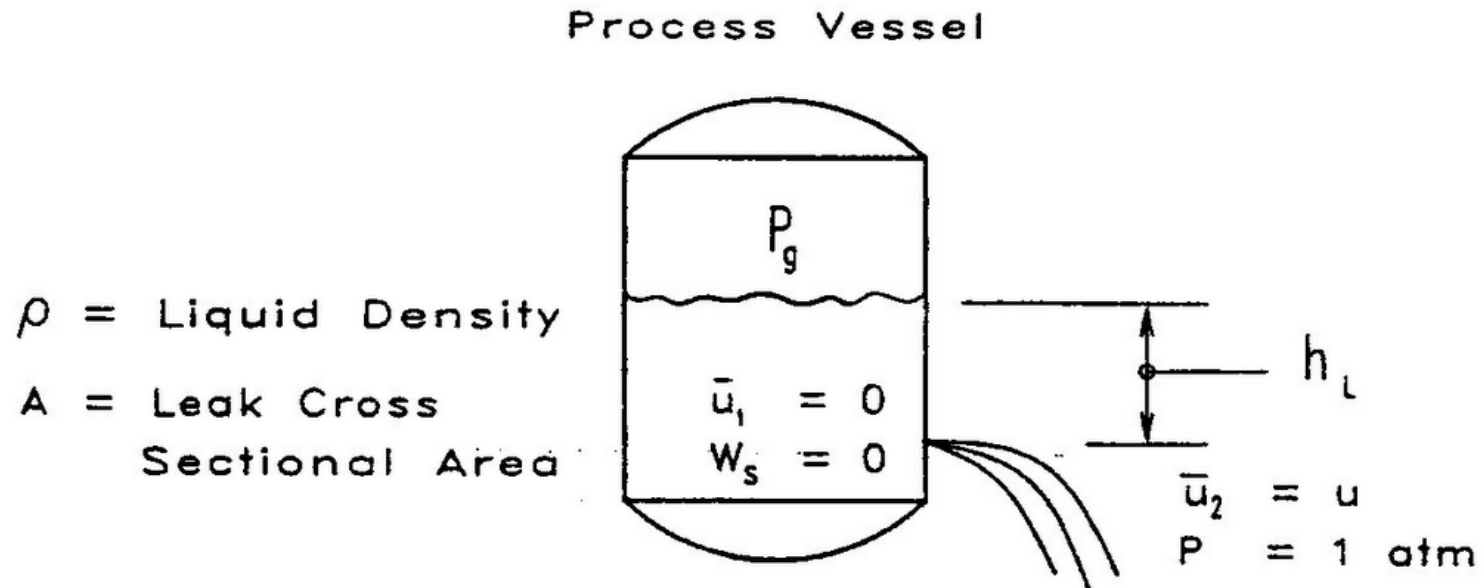
## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)



Pressão no interior do processo é constante  
(injeção de gás inerte, ou abertura para a atmosfera)

# Modelos de Fonte

## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)



Se,

Pressão externa: pressão atmosférica

Então,

$$\Delta P = P_g$$

$P_g$ : pressão manométrica

A pressão manométrica é a medição da pressão em relação à pressão atmosférica existente no local. Logo, é uma pressão relativa.



## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = - \frac{W_s}{\dot{m}}$$

0

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - \frac{g}{g_c} \Delta z - F$$

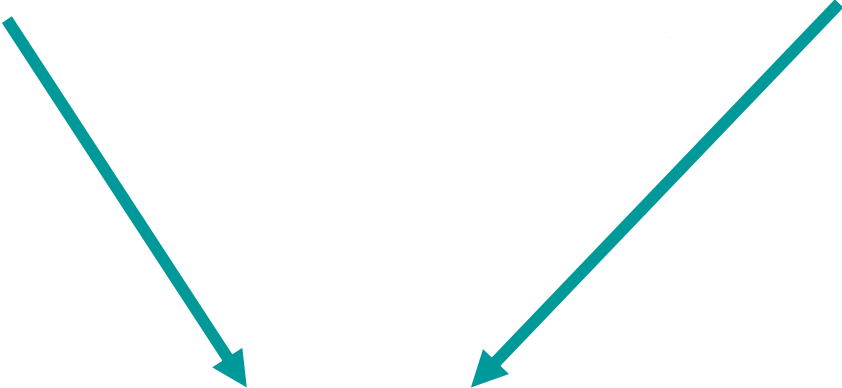
Re-escrevendo usando uma constante (coeficiente de descarga):

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - \frac{g}{g_c} \Delta z - F = C_1^2 \left( -\frac{\Delta P}{\rho} - \frac{g}{g_c} \Delta z \right)$$

## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)

$$\Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right)$$

$$C_1^2 \left( -\frac{\Delta P}{\rho} - \frac{g}{g_c} \Delta z \right)$$


$$\bar{u} = C_1 \sqrt{\alpha} \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L \right)}$$

## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)

Velocidade instantânea de saída do fluido:

$$\bar{u} = C_o \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L \right)}$$

Vazão mássica instantânea de saída:

$$Q_m = \rho \bar{u} A = \rho A C_o \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + gh_L \right)}.$$

**Atenção:**

**Tudo é função do nível de líquido acima do furo.  
Esse nível vai diminuindo ao longo do tempo!**



## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)

Comportamento do nível em função do tempo:

$$Q_m = \rho \bar{u} A = \rho A C_o \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L \right)}$$

$$m = \rho A_t h_L$$

For a tank of constant cross-sectional area  $A_T$  the total mass of liquid in the tank above the leak.

$$\frac{dm}{dt} = -\dot{Q}_m$$

The rate of change of mass within the tank

**Atenção: a partir deste ponto o modelo se aplica apenas para tanques cilíndricos.**



$$\frac{dm}{dt} = -\rho A C_0 \sqrt{2 \left( \frac{\rho_c P_g}{\rho} + g h_c \right)}$$

$$\cancel{\rho A} \frac{dh_c}{dt} = -\cancel{\rho} A C_0 \sqrt{2 \left( \frac{\rho_c P_g}{\rho} + g h_c \right)}$$

$$\frac{dh_c}{dt} = -\frac{A}{A_T} C_0 \sqrt{\dots}$$

Integrando:

$$\int_{h_L^o}^{h_L} \frac{dh_L}{\sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho} + 2gh_L}} = -\frac{C_o A}{A_t} \int_0^t dt$$

Temos:

**Comportamento do nível em função do tempo:**

$$h_L = h_L^o - \frac{C_o A}{A_t} \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho} + 2gh_L^o} t + \frac{g}{2} \left( \frac{C_o A}{A_t} t \right)^2.$$

Onde:

$h_L^o$  é o nível de líquido acima do fluido no início

$A_t$ : área superficial do tanque

$g$ : aceleração da gravidade

$t$ : tempo

**Atenção: o modelo se aplica apenas para tanques cilíndricos.**



**Note:**

**Comportamento do nível em função do tempo:**

$$h_L = h_L^o - \frac{C_o A}{A_t} \sqrt{\frac{2g_c P_g}{\rho} + 2gh_L^o} t + \frac{g}{2} \left( \frac{C_o A}{A_t} t \right)^2.$$



## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)

$$Q_m = \rho \bar{u} A = \rho A C_o \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L \right)}$$

$$h_L = h_L^o - \frac{C_o A}{A_t} \sqrt{\frac{2 g_c P_g}{\rho} + 2 g h_L^o} t + \frac{g}{2} \left( \frac{C_o A}{A_t} t \right)^2$$

Vazão mássica instantânea de saída em função do tempo:

$$Q_m = \rho C_o A \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L^o \right)} - \frac{\rho g C_o^2 A^2}{A_t} t$$

**Atenção: o modelo se aplica apenas para tanques cilíndricos.**





## Vazão de líquido através de um furo (modelo para tanques)

Tempo total de vazamento:

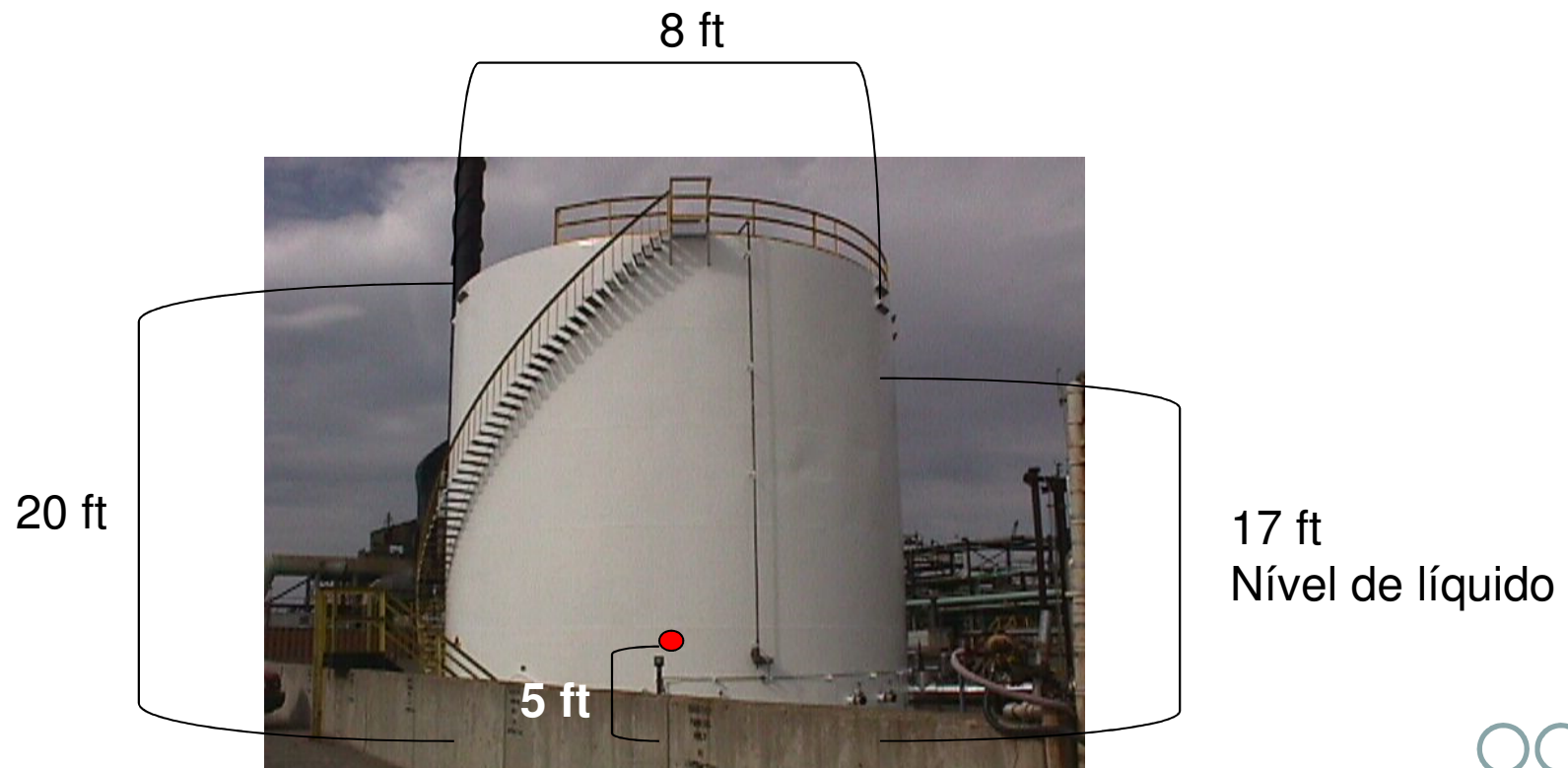
$$t_e = \frac{1}{C_o g} \left( \frac{A_t}{A} \right) \left[ \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L^o \right)} - \sqrt{\frac{2 g_c P_g}{\rho}} \right]$$

**Atenção: o modelo se aplica apenas para tanques cilíndricos.**



Exemplo:

A cylindrical tank 20 ft high and 8 ft in diameter is used to store benzene. The tank is padded with nitrogen to a constant regulated pressure of 1 atm gauge to prevent explosion. The liquid level within the tank is presently at 17 ft. A 1-in puncture occurs in the tank 5 ft off the ground because of the careless driving of a forklift truck. Estimate (a) the gallons of benzene spilled, (b) the time required for the benzene to leak out, and (c) the maximum mass flow rate of benzene through the leak. The specific gravity of benzene at these conditions is 0.8794.



A cylindrical tank 20 ft high and 8 ft in diameter is used to store benzene. The tank is padded with nitrogen to a constant regulated pressure of 1 atm gauge to prevent explosion. The liquid level within the tank is presently at 17 ft. A 1-in puncture occurs in the tank 5 ft off the ground because of the careless driving of a forklift truck. Estimate (a) the gallons of benzene spilled, (b) the time required for the benzene to leak out, and (c) the maximum mass flow rate of benzene through the leak. The specific gravity of benzene at these conditions is 0.8794.

- 1) Calcular a área superficial do tanque em pés quadrados
- 2) Calcular a área do furo em pés quadrados
- 3) Converter  $P_g$  de atm para lbf/ft<sup>2</sup>
- 4) Calcular o volume de líquido no tanque acima do furo, em pés cúbicos

$$V = \text{Area da base} * \text{Altura}$$



A cylindrical tank 20 ft high and 8 ft in diameter is used to store benzene. The tank is padded with nitrogen to a constant regulated pressure of 1 atm gauge to prevent explosion. The liquid level within the tank is presently at 17 ft. A 1-in puncture occurs in the tank 5 ft off the ground because of the careless driving of a forklift truck. Estimate (a) the gallons of benzene spilled, (b) the time required for the benzene to leak out, and (c) the maximum mass flow rate of benzene through the leak. The specific gravity of benzene at these conditions is 0.8794.

- 5) Converter de pé cúbico para galão
- 6) **Assumir  $C_o = 0.61$** ,  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ ,  $g_c = 32.17 \text{ ft-lbm/lbf-seg}^2$   
densidade do benzeno:  $54.9 \text{ lbm/ft}^3$  (exemplo anterior)
- 7) Calcular o tempo em segundos para esvaziar o tanque
- 8) Calcular a vazão máxima ocorrida



A cylindrical tank 20 ft high and 8 ft in diameter is used to store benzene. The tank is padded with nitrogen to a constant regulated pressure of 1 atm gauge to prevent explosion. The liquid level within the tank is presently at 17 ft. A 1-in puncture occurs in the tank 5 ft off the ground because of the careless driving of a forklift truck. Estimate (a) the gallons of benzene spilled, (b) the time required for the benzene to leak out, and (c) the maximum mass flow rate of benzene through the leak. The specific gravity of benzene at these conditions is 0.8794.

- 5) Converter de pé cúbico para galão
- 6) **Assumir  $C_o = 0.61$** ,  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ ,  $g_c = 32.17 \text{ ft-lbm/lbf-seg}^2$   
densidade do benzeno:  $54.9 \text{ lbm/ft}^3$  (exemplo anterior)
- 7) Calcular o tempo em segundos para esvaziar o tanque
- 8) Calcular a vazão máxima ocorrida



## Solução:

The area of the tank is

$$A_t = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.14)(8 \text{ ft})^2}{4} = 50.2 \text{ ft}^2.$$

The area of the leak is

$$A = \frac{(3.14)(1 \text{ in})^2(1 \text{ ft}^2/144 \text{ in}^2)}{4} = 5.45 \times 10^{-3} \text{ ft}^2.$$

The gauge pressure is

$$P_g = (1 \text{ atm})(14.7 \text{ lb}_f/\text{in}^2)(144 \text{ in}^2/\text{ft}^2) = 2.12 \times 10^3 \text{ lb}_f/\text{ft}^2.$$

a. The volume of benzene above the leak is

$$V = A_t h_L^o = (50.2 \text{ ft}^2)(17 \text{ ft} - 5 \text{ ft})(7.48 \text{ gal}/\text{ft}^3) = 4506 \text{ gal}.$$

This is the total benzene that will leak out.

Conversão de ft<sup>3</sup> para galão



b. The length of time for the benzene to leak out is given by Equation 4-20:

$$\begin{aligned}
 t_e &= \frac{1}{C_o g} \left( \frac{A_t}{A} \right) \left[ \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L^o \right)} - \sqrt{\frac{2 g_c P_g}{\rho}} \right] \\
 &= \frac{1}{(0.61)(32.17 \text{ ft/s}^2)} \left( \frac{50.2 \text{ ft}^2}{5.45 \times 10^{-3} \text{ ft}^2} \right) \\
 &\quad \times \left\{ \left[ \frac{(2)(32.17 \text{ ft} \cdot \text{lb}_m / \text{lb}_r \cdot \text{s}^2)(2.12 \times 10^3 \text{ lb}_f / \text{ft}^2)}{54.9 \text{ lb}_m / \text{ft}^3} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + (2)(32.17 \text{ ft/s}^2)(12 \text{ ft}) \right]^{1/2} - \sqrt{2484 \text{ ft}^2 / \text{s}^2} \right\} \\
 &= (469 \text{ s}^2 / \text{ft})(7.22 \text{ ft}^2 / \text{s}^2) = 3386 \text{ s} = 56.4 \text{ min.}
 \end{aligned}$$

This appears to be more than adequate time to stop the leak or to invoke an emergency procedure to reduce the impact of the leak. However, the maximum discharge occurs when the hole is first opened.

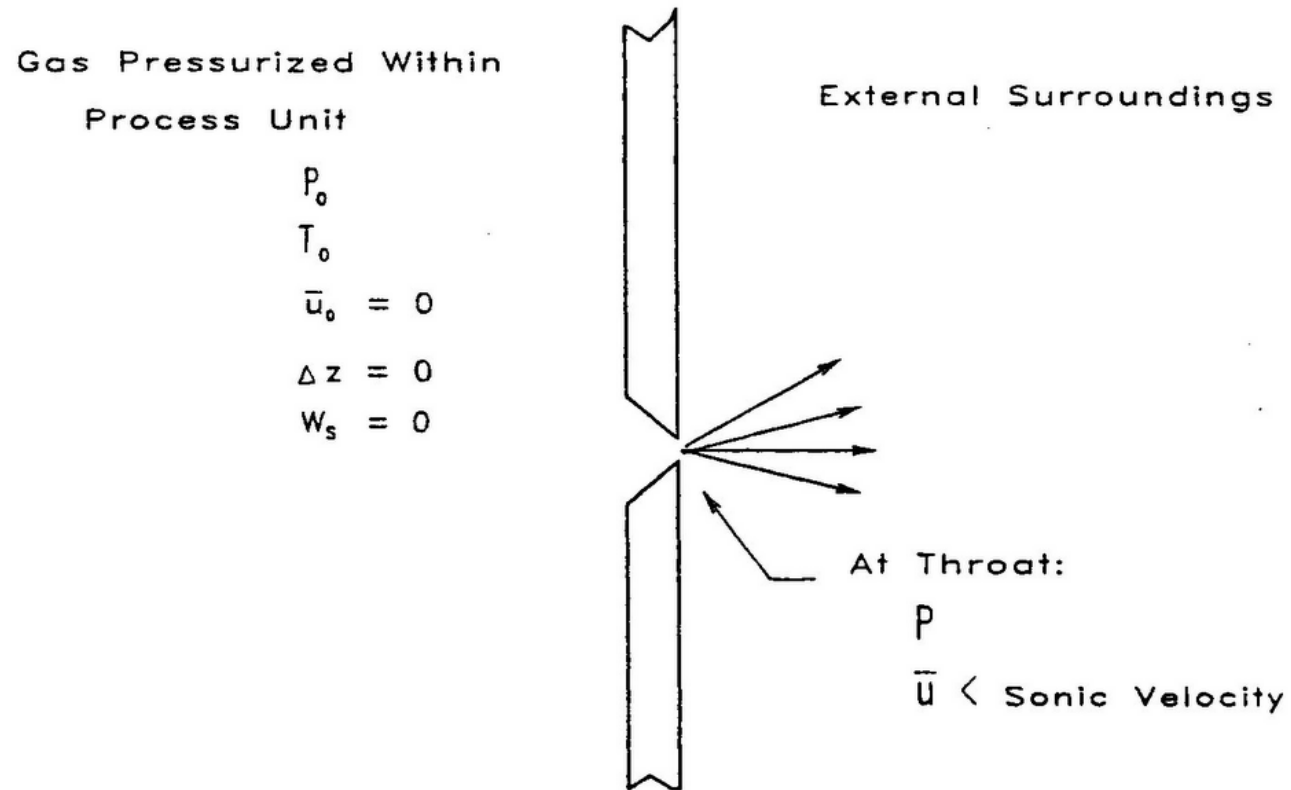
c. The maximum discharge occurs at  $t = 0$  at a liquid level of 17.0 ft. Equation 4-19 is used to compute the mass flow rate:

$$\begin{aligned}
 Q_m &= \rho A C_o \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L^o \right)} \\
 &= (54.9 \text{ lb}_m / \text{ft}^3)(5.45 \times 10^{-3} \text{ ft}^2) \boxed{0.61} \sqrt{3.26 \times 10^3 \text{ ft}^2 / \text{s}^2} \\
 &= 10.4 \text{ lb}_m / \text{s}.
 \end{aligned}$$



# Modelos de Fonte

## Vazão de gás através de um furo



Análise para expansão livre.  
Não se aplica a estrangulamento, quando o diâmetro de furo é muito pequeno.





## Vazão de gás através de um furo

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = - \frac{W_s}{\dot{m}}$$

0                      0

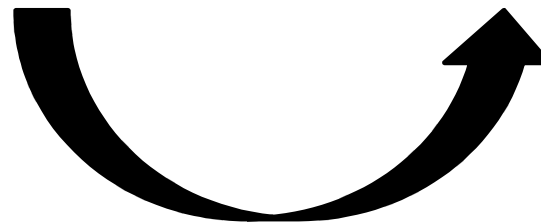


## Vazão de gás através de um furo

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = -\frac{W_s}{\dot{m}}$$

Diagram illustrating the Bernoulli equation for gas flow through an orifice. The equation is shown with annotations: a blue arrow points from the first term to the simplified equation below; a black arrow points from the second term to a '0' below it; a blue arrow points from the third term to the simplified equation below; and a black arrow points from the fourth term to a '0' below it.

$$-\int \frac{dP}{\rho} - F = C_1^2 \left( -\int \frac{dP}{\rho} \right)$$



Re-escrevendo usando uma constante





## Vazão de gás através de um furo

Assumindo gás ideal em expansão isentrópica:

$$\rho = \rho_o \left( \frac{P}{P_o} \right)^{1/\gamma}$$

$$\gamma = C_p / C_v$$

$$C_1^2 \int_{P_o}^P \frac{dP}{\rho} + \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} = 0$$

Integrando e agrupando as constantes temos:

$$\bar{u}^2 = 2g_c C_o^2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_o}{\rho_o} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_o} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] = \frac{2g_c C_o^2 R_g T_o}{M} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_o} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]$$

Onde R é a constante dos gases ideais e T a temperatura da fonte.



## Vazão de gás através de um furo

Sabendo que:  $Q_m = \rho \bar{u} A$

Encontramos **Vazão mássica**:

$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_o} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P}{P_o} \right)^{2/\gamma} - \left( \frac{P}{P_o} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]}$$

*Assumindo gás ideal e expansão isentrópica.*



**Note:**

Vazão mássica:

Po aumenta,  
Qm aumenta

$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_o} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P}{P_o} \right)^{2/\gamma} - \left( \frac{P}{P_o} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]}$$



Gas Pressurized Within  
Process Unit

$$P_0$$

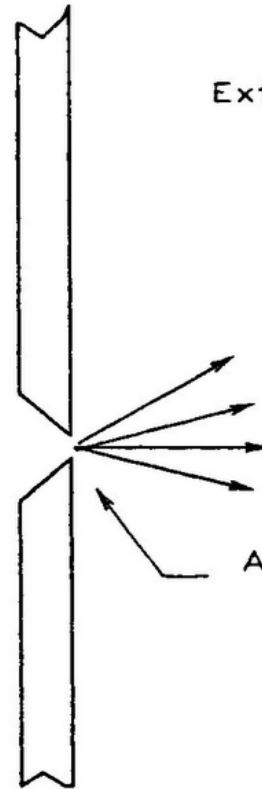
$$T_0$$

$$\bar{u}_0 = 0$$

$$\Delta z = 0$$

$$W_s = 0$$

External Surroundings

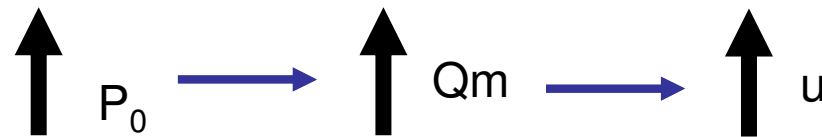


At Throat:

$$P$$

$$\bar{u} < \text{Sonic Velocity}$$

Hipótese:

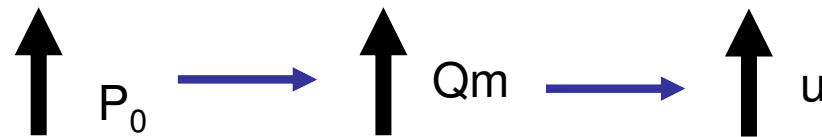


Rapidamente...



u

Hipótese:





Rapidamente...



u

Mas o escoamento do gás através do furo tem como velocidade máxima a **velocidade do som!**



## Modelo de Choked para Vazamento de gás

Definição:

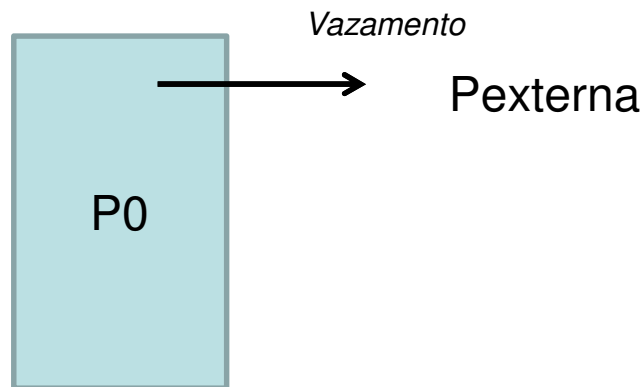
*“ $P_{choked}$  é a máxima pressão externa que ainda resulta no escoamento máximo através do furo.”*

(CROWL, 2ª Ed, Pag 132)

$$\frac{P_{choked}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

**ATENÇÃO:**  
Pressões em PSIA  
1 atm = 14,7 psi

## Exemplo ilustrativo (valores não correspondem ao real)



$P_0 = 73.5$  psia     $P_{externa} = 14,7$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 25,0$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 35,0$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 40,0$  psia  
Escoamento em velocidade menor que a do som

$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 55,0$  psia  
Escoamento em velocidade menor que a do som

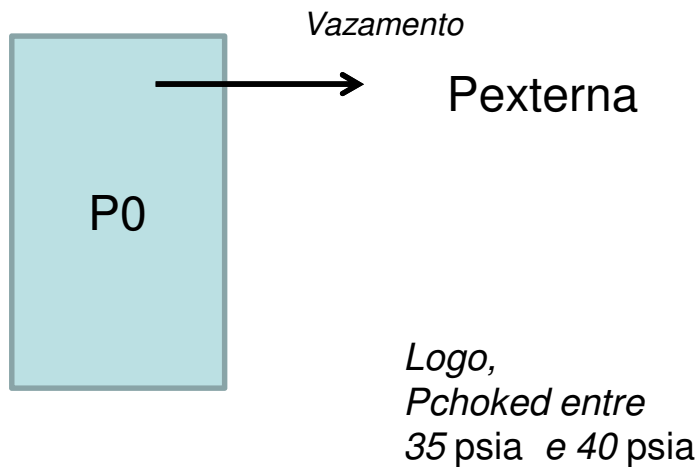
$P_{choked}$  é a máxima pressão externa que

ainda resulta no escoamento máximo através do furo.

(CROWL, 2ª Ed, Pag 132)

$$\frac{P_{choked}}{P_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

## Exemplo ilustrativo (valores não correspondem ao real)



$P_0 = 73.5$  psia     $P_{externa} = 14,7$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 25,0$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 35,0$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 40,0$  psia  
Escoamento em velocidade menor que  
a do som

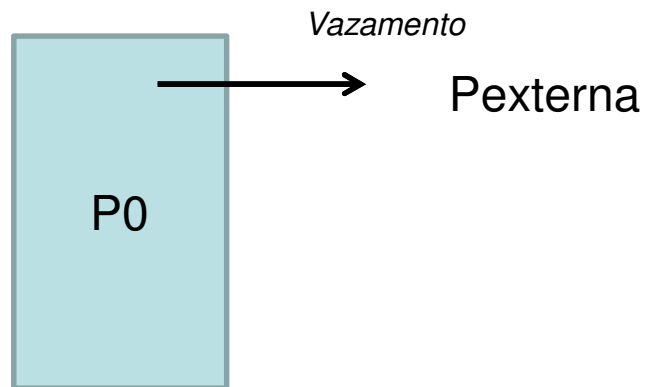
$P_0 = 73,5$  psia     $P_{externa} = 55,0$  psia  
Escoamento em velocidade menor que  
a do som

$P_{choked}$  é a máxima pressão externa que  
ainda resulta no escoamento máximo através do furo.

(CROWL, 2ª Ed, Pag 132)

$$\frac{P_{choked}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

## Exemplo ilustrativo (valores não correspondem ao real)



$P_0 = 15$  psia     $P_{externa} = 14,7$  psia  
Escoamento em velocidade menor que a do som

$P_0 = 20$  psia     $P_{externa} = 14,7$  psia  
Escoamento em velocidade menor que a do som

$P_0 = 25$  psia     $P_{externa} = 14,7$  psia  
Escoamento em velocidade menor que a do som

$P_0 = 30$  psia     $P_{externa} = 14,7$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0 = 40$  psia     $P_{externa} = 14,7$  psia  
Escoamento na velocidade do som

$P_0$  é a mínima pressão interna que resulta no escoamento máximo através do furo.

$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

## Modelo de Choked para Vazamento de gás

Definição:

$P_{choked}$  é a máxima pressão externa que ainda resulta no escoamento máximo através do furo.

(CROWL, 2ª Ed, Pag 132)

Para pressões externas menores que  $P_{choked}$ , é válido afirmar que:

- i. A velocidade de escoamento do fluido é a velocidade do som naquelas condições
- ii. A velocidade e a vazão mássica não podem ser aumentadas reduzindo a pressão externa.



## Modelo de Choked para Vazamento de gás

Definição:

$P_{choked}$  é a máxima pressão externa que ainda resulta no escoamento máximo através do furo.

(CR)

Muito embora possa ser aumentada elevando a pressão interna.

Para pressões externas menores que  $P_{choked}$ , é válido afirmar que:

- i. A velocidade de escoamento do fluido é a velocidade do som naquelas condições
- ii. A velocidade e a **vazão mássica** não podem ser aumentadas reduzindo a pressão externa.



Tabela de valores na próxima transparência

$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

Pressão  
interna

**ATENÇÃO:**  
**Pressões em PSIA**

Note:  
9 / 3 = 3  
(9+1) / (3+1) <> 3

psia = psig + 14,696

psig: abreviação de pounds per square inch gauge – libras por polegada quadrada manométrica.

psia: abreviação para pounds per square inch absolute – libras por polegada quadrada absoluta (inclui a pressão atmosférica),





**Table 4-3** Heat Capacity Ratios  $\gamma$  for Selected Gases<sup>1</sup>

Gas	Chemical formula or symbol	Approximate molecular weight ( <i>M</i> )	Heat capacity ratio $\gamma = C_p/C_v$
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.0	1.30
Air	-	29.0	1.40
Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.0	1.32
Argon	Ar	39.9	1.67
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1	1.11
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.0	1.30
Carbon monoxide	CO	28.0	1.40
Chlorine	Cl	70.9	1.33
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.0	1.22
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.0	1.22
Helium	He	4.0	1.66
Hydrogen chloride	HCl	36.5	1.41
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.0	1.41
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	34.1	1.30
Methane	CH <sub>4</sub>	16.0	1.32
Methyl chloride	CH <sub>3</sub> Cl	50.5	1.20
Natural gas	-	19.5	1.27
Nitric oxide	NO	30.0	1.40
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0	1.41
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	44.0	1.31
Oxygen	O <sub>2</sub>	32.0	1.40
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.1	1.15
Propene (propylene)	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.1	1.14
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.1	1.26



$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

**Valor aproximado:**

<b>Gas</b>	$\gamma$	$P_{\text{choked}}$
Monotonic	$\cong 1.67$	$0.487P_0$
Diatomic and air	$\cong 1.40$	$0.528P_0$
Triatomic	$\cong 1.32$	$0.542P_0$



# Abordagem 1:

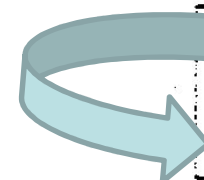


Gas	$\gamma$	$P_{\text{choked}}$
Monatomic	$\cong 1.67$	$0.487P_o$
Diatomic and air	$\cong 1.40$	$0.528P_o$
Triatomic	$\cong 1.32$	$0.542P_o$

1) Assumo  $P_{\text{choked}}$  igual a Pressão Externa dada.

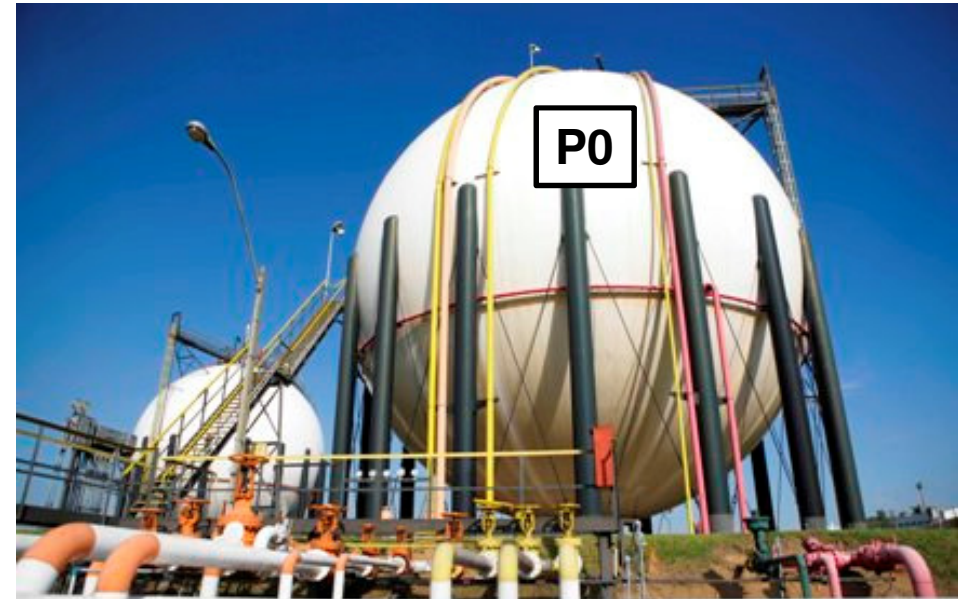
2) Encontro Pressão Interna calculada ( $P_o$ )

3) Se Pressão Interna real for maior que pressão interna calculada, então CHOKED.


$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$



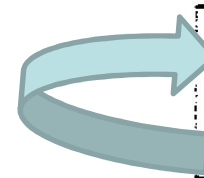
## Abordagem 2:



Gas	$\gamma$	$P_{\text{choked}}$
Monotonic	$\cong 1.67$	$0.487P_o$
Diatomic and air	$\cong 1.40$	$0.528P_o$
Triatomic	$\cong 1.32$	$0.542P_o$

1) Sabendo  $P_0$  real, calculo  $P_{\text{choked}}$ .

2) Se  $P_{\text{externa}}$  menor que  $P_{\text{choked}}$ , então **CHOKED**.


$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$



## Exemplo pela abordagem 2

A 0.1-in hole forms in a tank containing nitrogen at 200 psig and 80°F. Determine the mass flow rate through this leak.

### Solution

From Table 4-3, for nitrogen  $\gamma = 1.41$ . Then from Equation 4-49

$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left( \frac{2}{2.41} \right)^{1.41/0.41} = 0.527.$$

Thus

$$P_{\text{choked}} = 0.527(200 + 14.7) \text{ psia} = 113.1 \text{ psia}.$$

An external pressure less than 113.1 psia will result in choked flow through the leak. Because the external pressure is atmospheric in this case, choked flow is expected

---

### ATENÇÃO: Pressões em PSIA

psia = psig + 14,696

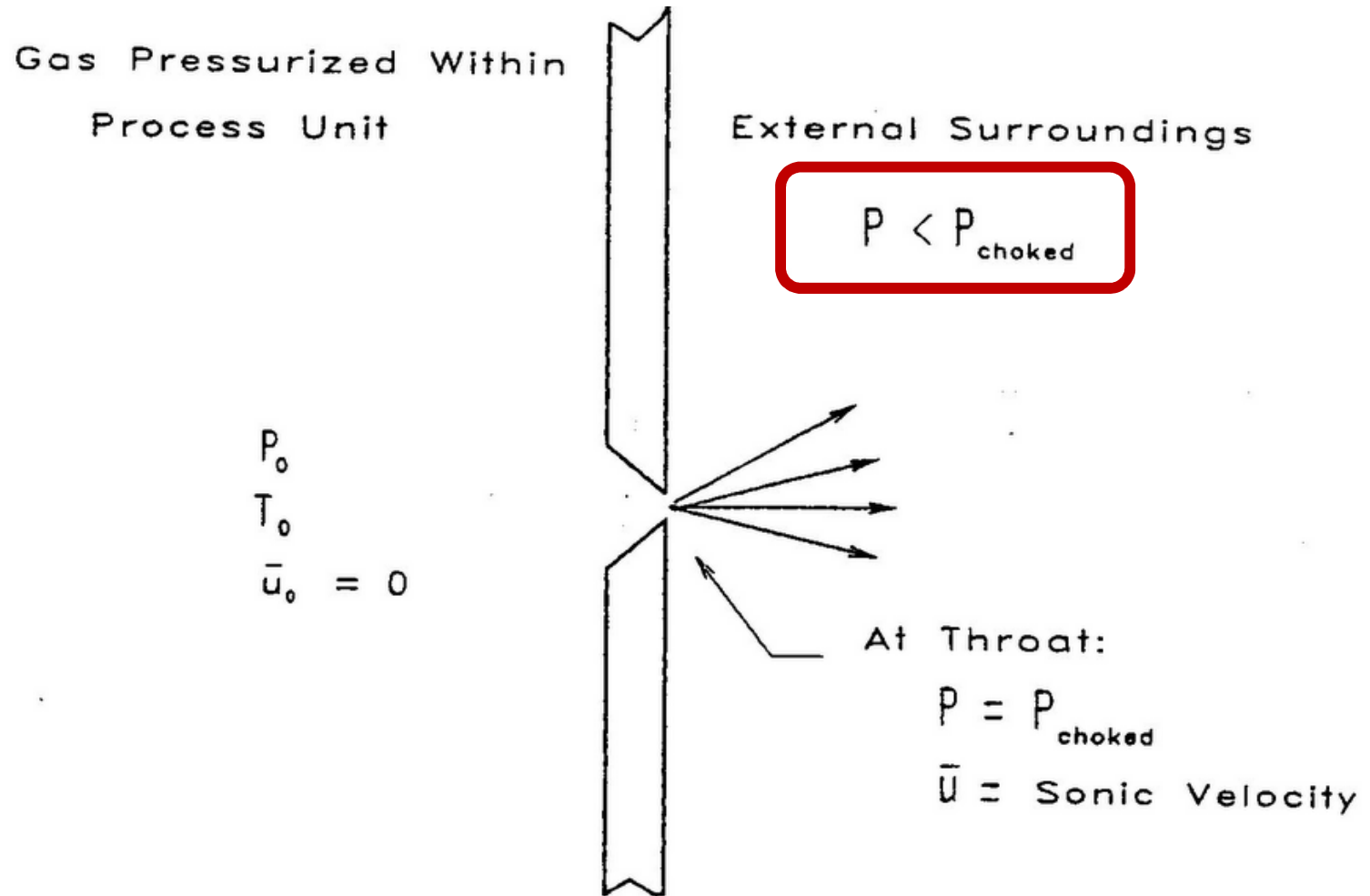
psig: abreviação de pounds per square inch gauge – libras por polegada quadrada manométrica.

psia: abreviação para pounds per square inch absolute – libras por polegada quadrada absoluta (inclui a pressão atmosférica),



# Modelos de Fonte

## Modelo de Choked para Vazamento de gás



## Modelo de Choked para Vazamento de gás

$$(Q_m)_{\text{choked}} = C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_o} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma-1)/(\gamma-1)}}$$

Onde:

M : peso molecular

R<sub>g</sub> : constante dos gases ideais

C<sub>o</sub> = 1.0

---

$$\bar{R} = 1545 \text{ ft lbf/lbm-mole } \quad \bar{R} = 0.082055 \text{ liter atm/mol K}$$

$$\bar{R} = 1.986 \text{ Btu/lbm-mole } \quad \bar{R} = 8.314 \text{ N m/mol K}$$

$$\bar{R} = 1.986 \text{ cal/mol K } \quad \bar{R} = 8.314 \times 10^3 \text{ N m/kmol K}$$

---



# Modelos de Fonte

## Modelo de Choked para Vazamento de gás

$$(Q_m)_{\text{choked}} = C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_o} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma - 1)/(\gamma - 1)}}$$



Vimos que reduzir a pressão externa NÃO aumenta a vazão de escoamento.

Mas é possível aumentar a vazão elevando a pressão  $P_0$ .





## Modelo de Choked para Vazamento de gás

### Explicações:

A velocidade do som em um gás real é função da pressão do mesmo. Assim, embora seja verdade que o escoamento permanece na velocidade do som, esta aumentou com o aumento da pressão.

<http://www.fisica.ufs.br/egsantana/ondas/acustica/sonido/sonido.htm>

---

A vazão é dada pela equação:

$$Q_m = \rho \bar{u} A$$



## Exemplo 1:

---

A 0.1-in hole forms in a tank containing nitrogen at 200 psig and 80°F. Determine the mass flow rate through this leak.

### Solution

From Table 4-3, for nitrogen  $\gamma = 1.41$ . Then from Equation 4-49

$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left( \frac{2}{2.41} \right)^{1.41/0.41} = 0.527.$$

Thus

$$P_{\text{choked}} = 0.527(200 + 14.7) \text{ psia} = 113.1 \text{ psia}.$$

An external pressure less than 113.1 psia will result in choked flow through the leak. Because the external pressure is atmospheric in this case, choked flow is expected and Equation 4-50 applies. The area of the hole is

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.14)(0.1 \text{ in})^2(1 \text{ ft}^2/144 \text{ in}^2)}{4} = 5.45 \times 10^{-5} \text{ ft}^2.$$



## Exemplo 1:

The discharge coefficient  $C_o$  is assumed to be 1.0. Also,

$$P_o = 200 + 14.7 = 214.7 \text{ psia.}$$

$$T_o = 80 + 460 = 540^\circ\text{R.}$$

$$\left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} = \left(\frac{2}{2.41}\right)^{2.41/0.41} = 0.829^{5.87} = 0.347.$$

Then, using Equation 4-50,

$$\begin{aligned}(Q_m)_{\text{choked}} &= C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_f T_o} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \\ &= (1.0)(5.45 \times 10^{-3} \text{ ft}^2)(214.7 \text{ lb}_f/\text{in}^2)(144 \text{ in}^2/\text{ft}^2) \\ &\quad \times \sqrt{\frac{(1.4)(32.17 \text{ ft lb}_m/\text{lb}_f \text{ s}^2)(28 \text{ lb}_m/\text{lb-mol})}{(1545 \text{ ft lb}_f/\text{lb-mol}^\circ\text{R})(540^\circ\text{R})}} (0.347) \\ &= 1.685 \text{ lb}_f \sqrt{5.24 \times 10^{-4} \text{ lb}_m^2/\text{lb}_f^2 \text{ s}^2}\end{aligned}$$

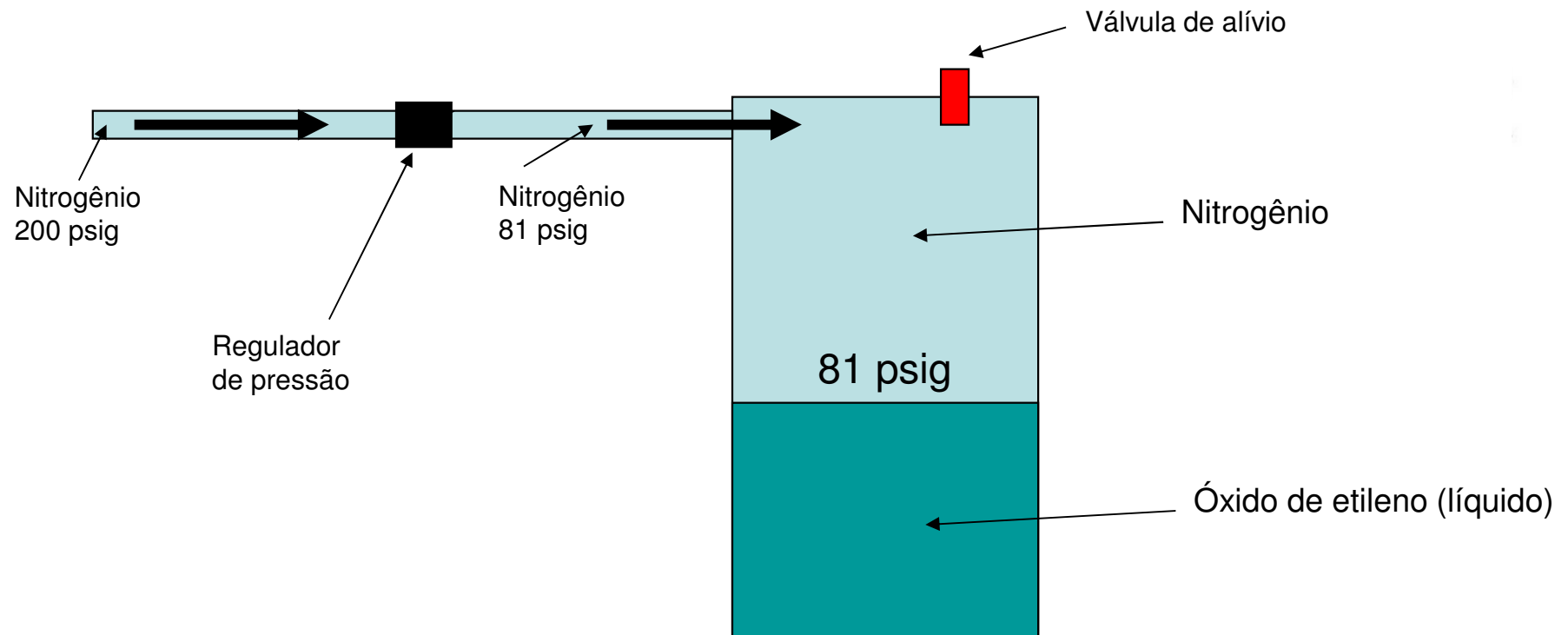
$$(Q_m)_{\text{choked}} = 3.86 \times 10^{-2} \text{ lb}_m/\text{s.}$$



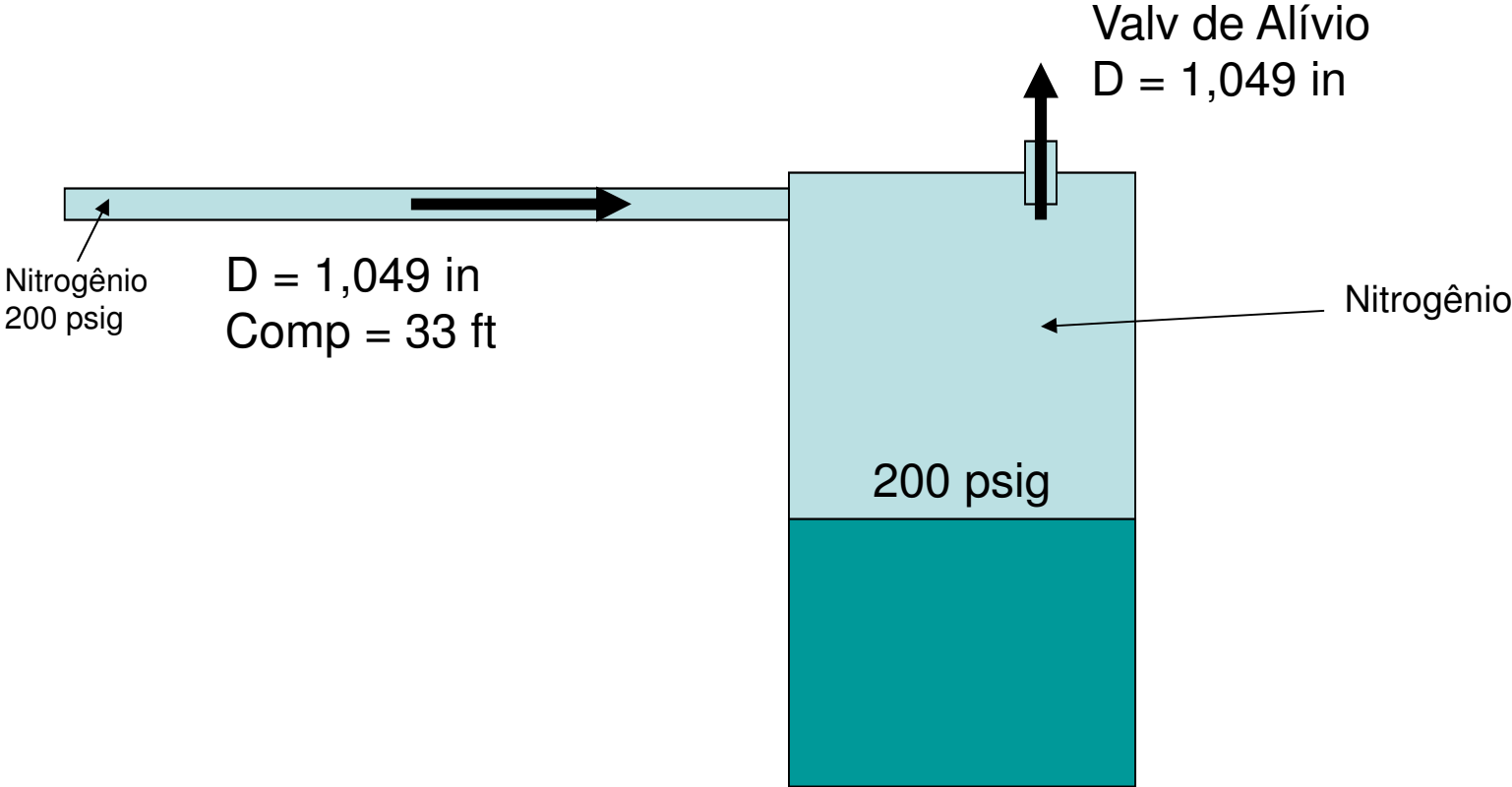
## Exemplo 2:

The vapor space above liquid ethylene oxide (EO) in storage tanks must be purged of oxygen and then padded with 81-psig nitrogen to prevent explosion. The nitrogen in a particular facility is supplied from a 200-psig source. It is regulated to 81-psig and supplied to the storage vessel through 33 ft of commercial steel pipe with an internal diameter of 1.049 in.

In the event of a failure of the nitrogen regulator, the vessel will be exposed to the full 200-psig pressure from the nitrogen source. This will exceed the pressure rating of the storage vessel. To prevent rupture of the storage vessel, it must be equipped with a relief device to vent this nitrogen.



# Exemplo 2:



- a. The maximum flow rate through the orifice occurs under choked conditions. The area of  
*(vazão de vapor através de um furo)*

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.14)(1.049 \text{ in})^2(1 \text{ ft}^2/144 \text{ in}^2)}{4}$$

$$= 6.00 \times 10^{-3} \text{ ft}^2.$$

The absolute pressure of the nitrogen source is

$$P_o = 200 + 14.7 = 214.7 \text{ psia} = 3.09 \times 10^4 \text{ lb}_f/\text{ft}^2.$$

The choked pressure from Equation 4-49 is, f

$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$P_{\text{choked}} = (0.528)(214.7 \text{ psia}) = 113.4 \text{ psia}$$

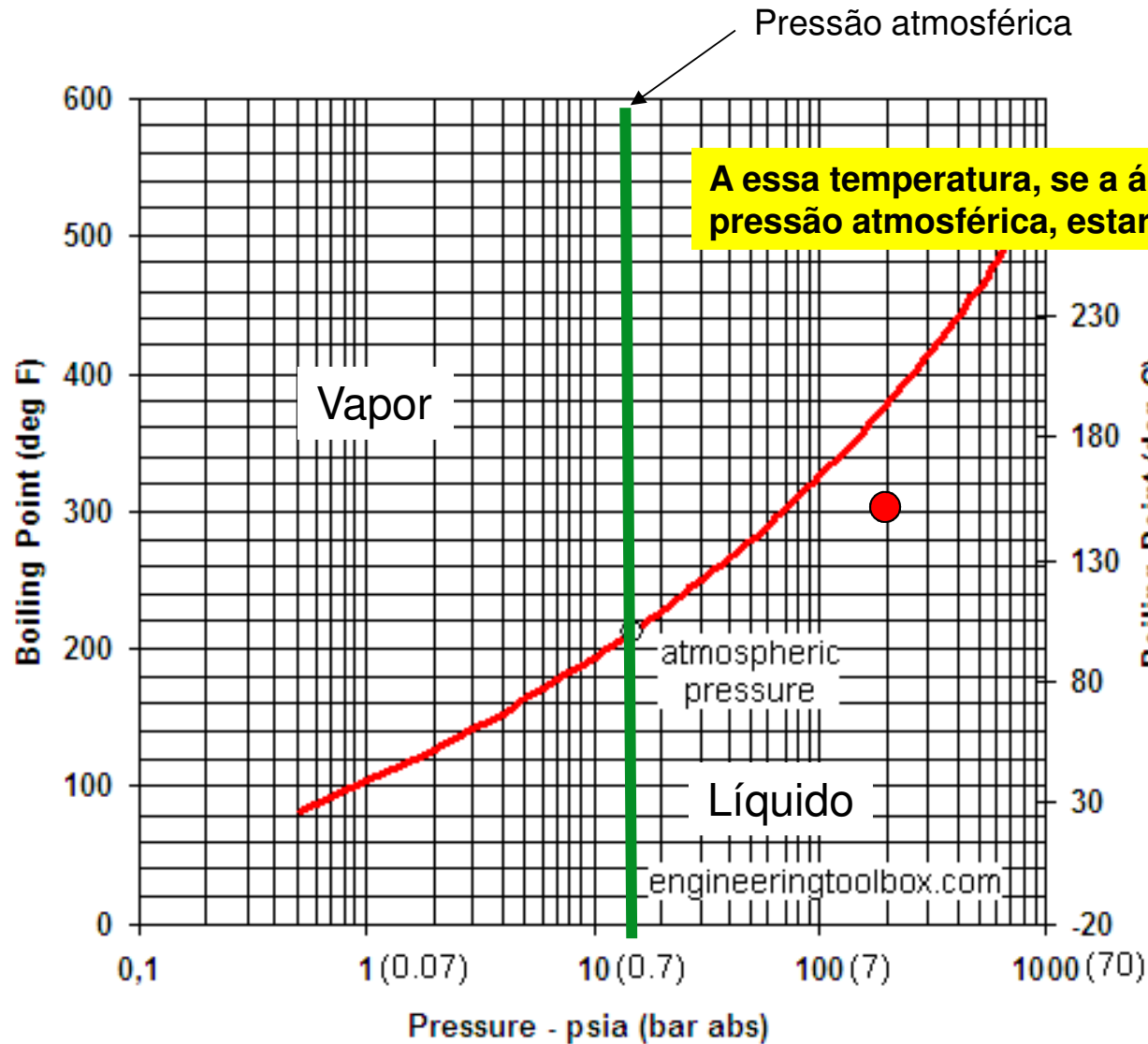
$$= 1.63 \times 10^4 \text{ lb}_f/\text{ft}^2.$$

$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = \left( \frac{2}{1.4+1} \right)^{1.4/1.4-1}$$

$$\frac{P_{\text{choked}}}{P_o} = 0.528$$



# Modelo de Flash

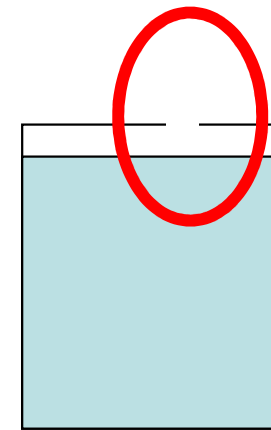
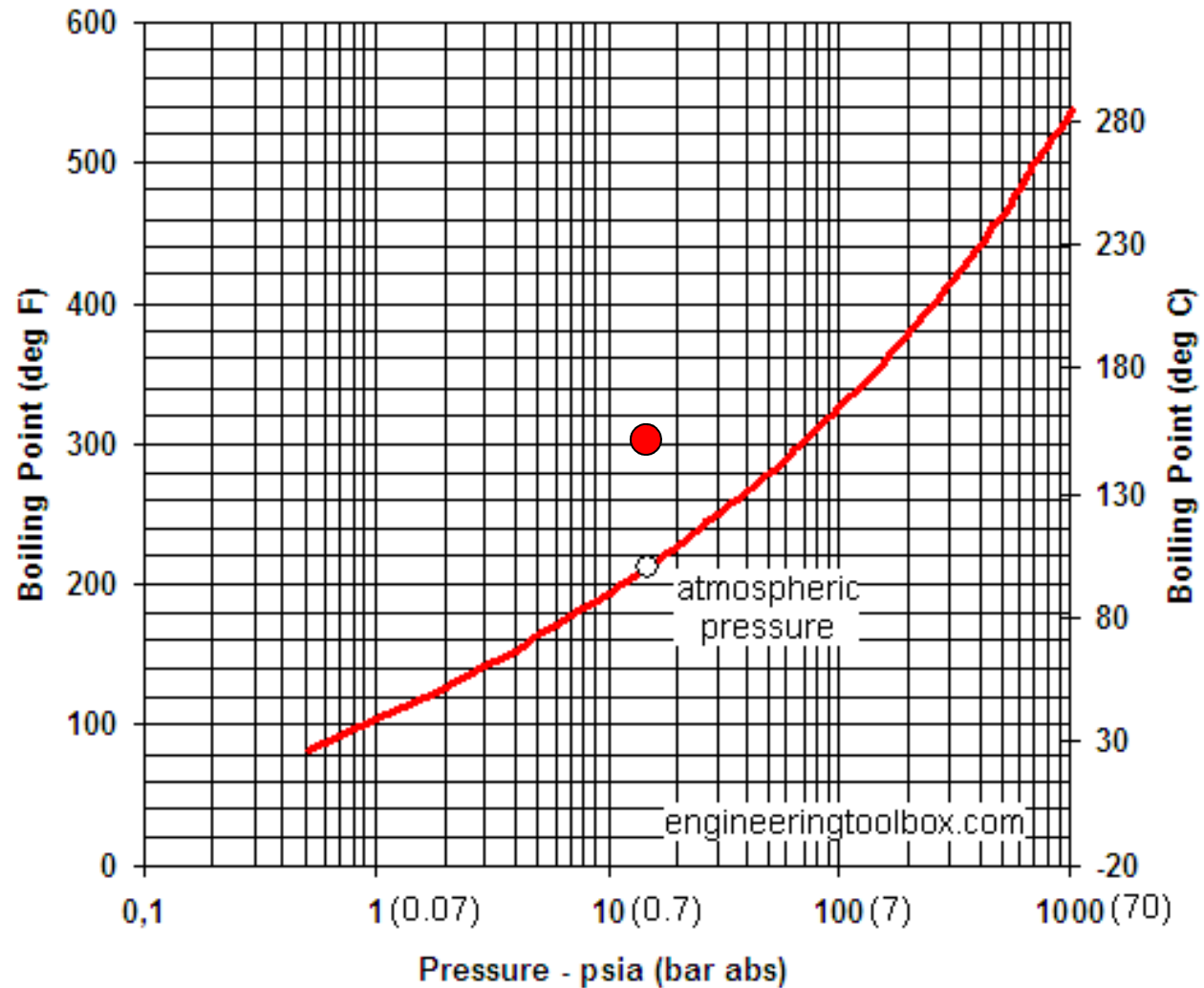


Água

Pressão= 200 psia  
Temp = 150°C



# Modelo de Flash



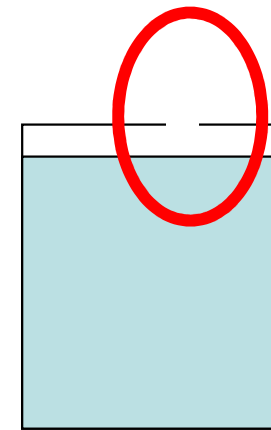
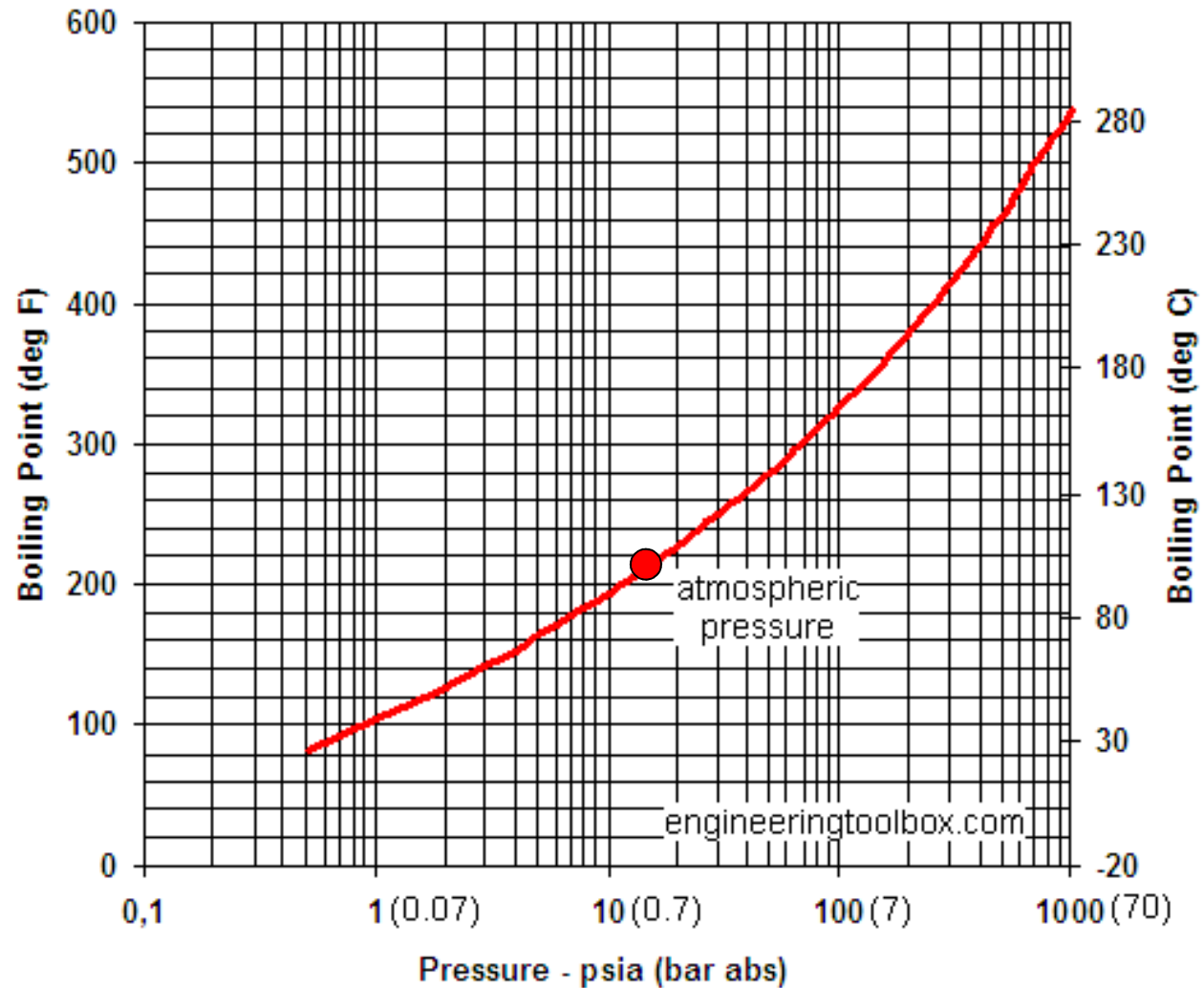
Água

Pressão = 14.69 psia  
Temp = 150°C





# Modelo de Flash



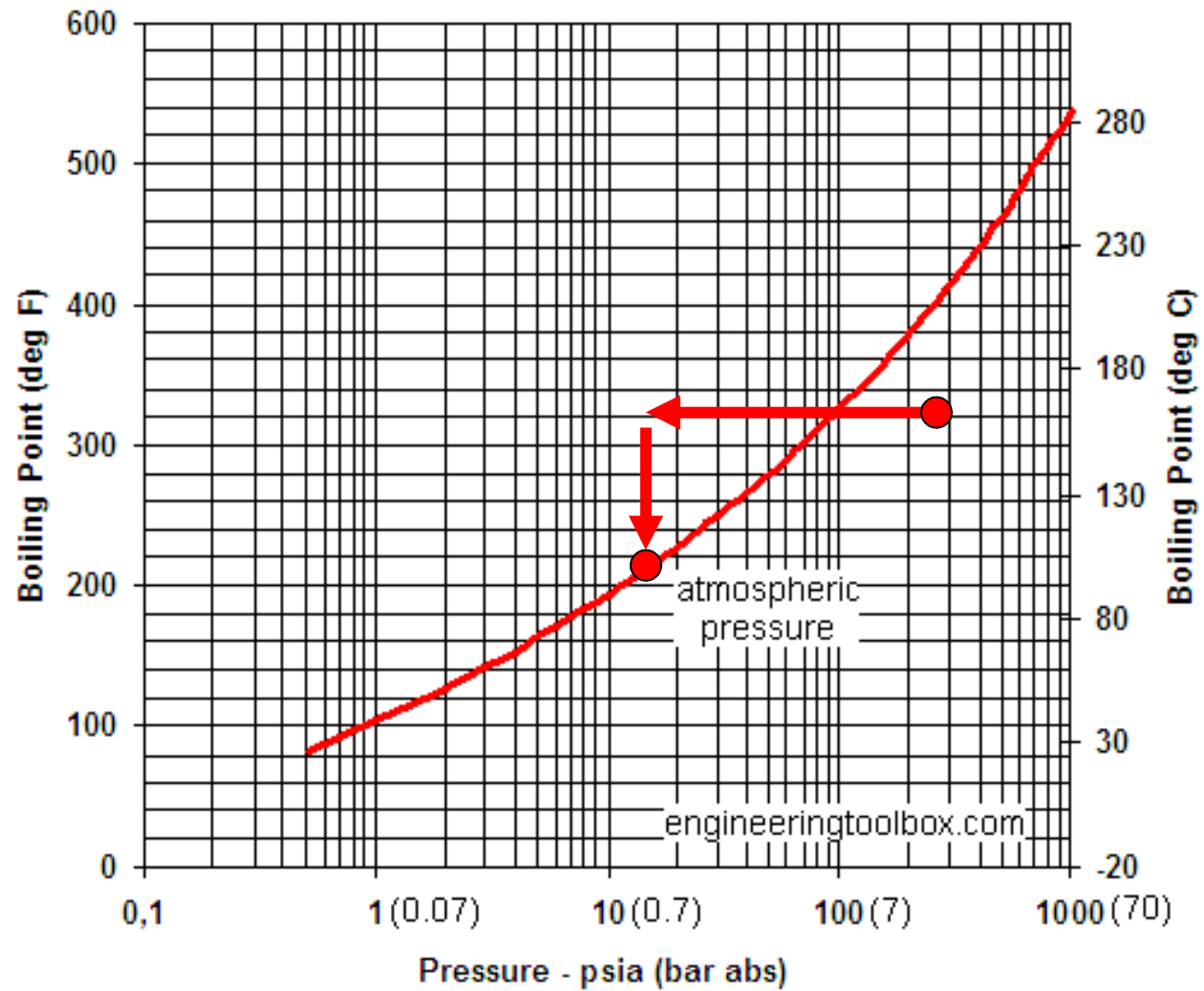
Água

Pressão= 14.69 psia

Temp = 100°C



# Modelo de Flash



# Modelo de Flash

Muitos líquidos são estocados sobre pressão em **temperatura acima da temperatura de ebulição a 1 atm.**

Quando o recipiente em que encontram-se armazenados sofre algum tipo de ruptura, a pressão cai rapidamente para 1 atm. Com a queda da pressão, a temperatura supera a temperatura de ebulição (1 atm), **provocando o FLASH.**

*O flash é quando uma parte do líquido passa para a fase vapor de forma extremamente rápida. O processo é tão rápido que pode ser assumido como adiabático.*



# Modelo de Flash

O excesso de energia contido no líquido super aquecido é responsável por promover a mudança de fase.

Calor:

$$Q = mC_p(T_o - T_b)$$

Cp do líquido

Massa: m

Temperatura do líquido antes da despressurização: To

Temperatura de ebulição na pressão alcançada após a despressurização: Tb



# Modelo de Flash

O calor será usado para vaporizar parcialmente o líquido. A massa de líquido vaporizada será:

$$m_v = \frac{Q}{\Delta H_v} = \frac{mC_p(T_o - T_b)}{\Delta H_v}.$$

Fração vaporizada:

$$f_v = \frac{m_v}{m} = \frac{C_p(T_o - T_b)}{\Delta H_v}.$$





**Exemplos:**

**GLP**

**GNL**



## Modelo de Flash

### Quando considerar FLASH?

#### Caso 1:

O caminho de liberação do líquido é curto (  $<10$  cm):

Considere que não existe tempo para o líquido flashear no trajeto.  
O flash acontece na parte externa.

Use as equações para líquido fluindo por um furo.



## Modelo de Flash

### Quando considerar FLASH?

#### Caso 2:

O caminho de liberação do líquido é longo (>10 cm): considere que existe tempo para o líquido flashear no trajeto.

O flash acontece no interior do trajeto de liberação, afetando a vazão de vazamento.

Caso o líquido esteja armazenado a uma pressão **superior** a pressão de saturação do vapor, use:

$$Q_m = AC_o \sqrt{2\rho_f g_c (P - P^{sat})},$$





## Modelo de Flash

$$Q_m = AC_o \sqrt{2\rho_f g_c (P - P^{sat})},$$

where

$A$  is the area of the release.

$C_o$  is the discharge coefficient (unitless),

$\rho_f$  is the density of the liquid (mass/volume),

$P$  is the pressure within the tank, and

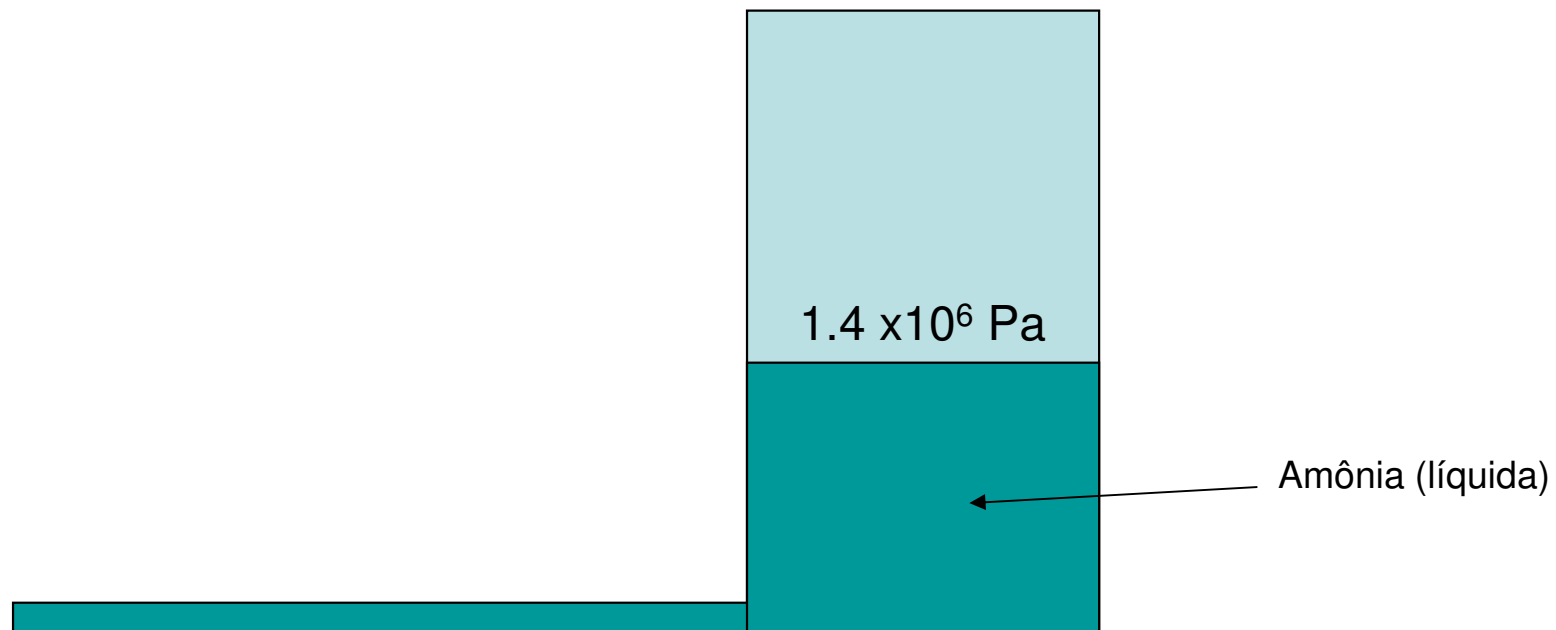
$P^{sat}$  is the saturation vapor pressure of the flashing liquid at ambient temperature.

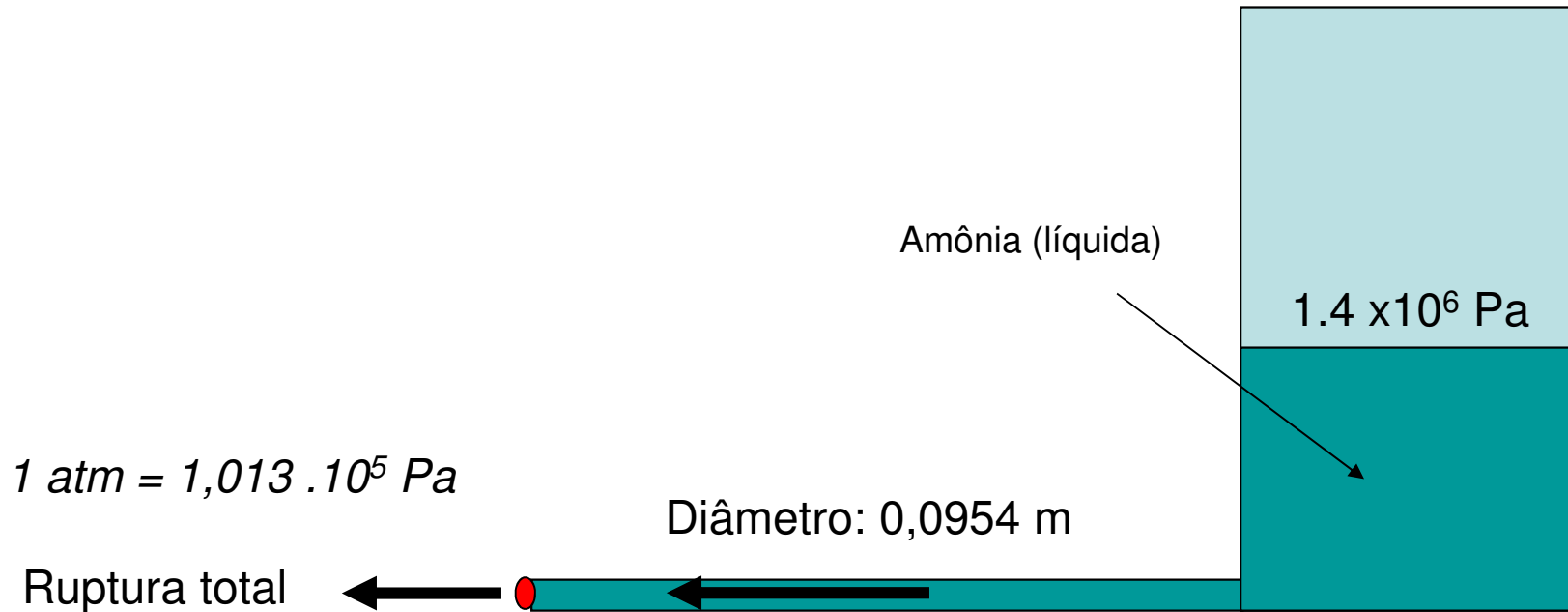
Temperatura de  
armazenagem



## Exemplo:

Liquid ammonia is stored in a tank at 24°C and a pressure of  $1.4 \times 10^6$  Pa. A pipe of diameter 0.0945 m breaks off a short distance from the vessel (the tank), allowing the flashing ammonia to escape. The saturation vapor pressure of liquid ammonia at this temperature is  $0.968 \times 10^6$  Pa, and its density is  $603 \text{ kg/m}^3$ . Determine the mass flow rate through the leak. Equilibrium flashing conditions can be assumed.





Caminho longo

Pressão de saturação  
na temperatura de armazenagem

$0.968 \times 10^6 \text{ Pa}$

Pressão de armazenagem

$1.4 \times 10^6 \text{ Pa}$



Exemplo:

Liquid ammonia is stored in a tank at 24°C and a pressure of  $1.4 \times 10^6$  Pa. A pipe of diameter 0.0945 m breaks off a short distance from the vessel (the tank), allowing the flashing ammonia to escape. The saturation vapor pressure of liquid ammonia at this temperature is  $0.968 \times 10^6$  Pa, and its density is  $603 \text{ kg/m}^3$ . Determine the mass flow rate through the leak. Equilibrium flashing conditions can be assumed.

### Solution

Equation 4-91 applies for the case of equilibrium flashing conditions. Assume a discharge coefficient of 0.61. Then

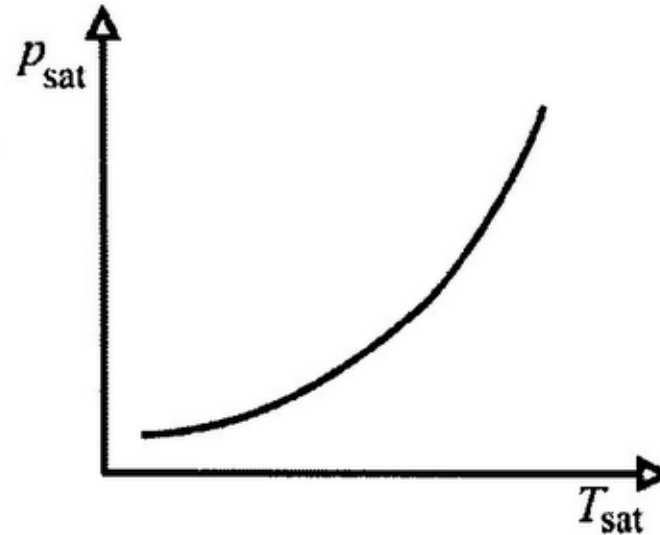
$$Q_m = AC_o \sqrt{2\rho_f g_c (P - P^{\text{sat}})}$$
$$= (0.61) \frac{(3.14)(0.0945 \text{ m})^2}{4} \times \sqrt{2(603 \text{ kg/m}^3)[1(\text{kg m/s}^2)/\text{N}](1.4 \times 10^6 - 0.968 \times 10^6)(\text{N/m}^2)}$$

$$Q_m = 97.6 \text{ kg/s.}$$

$g_c$  (gravitational constant) = 32.17 ft lbf/lbm-seg<sup>2</sup>  
 $g_c$  (gravitational constant) = 1 m kg / N seg<sup>2</sup> ○

# Dicas:

$P_{sat}$ :



A equação de Antoine é um ajuste muito bom para essa curva experimental.

$\ln p_{sat} = A + \frac{B}{T_{sat} + C}$ , onde:  $p_{sat}$  – pressão de saturação,  $T_{sat}$  – temperatura de saturação e

$A, B$  e  $C$  – constantes que dependem da substância

## Exemplos:

Pressão de vapor da água a 20°C é 2346 Pa

Pressão de vapor da água a 100°C é 101325 Pa (1 atm)



## Modelo de Poça (piscina)



Quanto maior a pressão de saturação de vapor, mais rapidamente evapora.

Asfalto: Pressão de vapor 0,93 mmHg a 98,9 °C

Etanol: Pressão de vapor 60 mmHg a 26 °C



## Modelo de Poça (piscina)

$$Q_m = \frac{MKAP^{sat}}{R_g T_L}$$

where

- $Q_m$  is the mass vaporization rate (mass/time),
- $M$  is the molecular weight of the pure material,
- $K$  is the mass transfer coefficient (length/time),
- $A$  is the area of exposure,
- $P^{sat}$  is the saturation vapor pressure of the liquid,
- $R_g$  is the ideal gas constant, and
- $T_L$  is the temperature of the liquid.

↙  
(em valor absoluto) (R ou K)

# Modelos de Fonte

## Modelo de Poça (piscina)

$$Q_m = \frac{MKAP^{sat}}{R_g T_L}$$

Onde:

$$K = K_o \left( \frac{M_o}{M} \right)^{1/3}$$

Water is most frequently used as a reference substance; it has a mass transfer coefficient<sup>11</sup> of 0.83 cm/s.





---

### Example 3-8

A large open tank with a 5-ft diameter contains toluene. Estimate the evaporation rate from this tank assuming a temperature of 77°F and a pressure of 1 atm.

---

### Solution

The molecular weight of toluene is 92. The mass transfer coefficient is estimated from Equation 3-18 using water as a reference:

$$K = (0.83 \text{ cm/s}) \left( \frac{18}{92} \right)^{1/3} = 0.482 \text{ cm/s} = 0.949 \text{ ft/min.}$$

The saturation vapor pressure is given in Example 3-4:

$$P_{\text{toluene}}^{\text{sat}} = 28.2 \text{ mm Hg} = 0.0371 \text{ atm.}$$

The pool area is

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.14)(5 \text{ ft})^2}{4} = 19.6 \text{ ft}^2.$$



• The evaporation rate is computed using Equation 3-12:

$$\begin{aligned} Q_m &= \frac{MKAP^{\text{sat}}}{R_g T_L} \\ &= \frac{(92 \text{ lb}_m/\text{lb-mol})(0.949 \text{ ft}/\text{min})(19.6 \text{ ft}^2)(0.0371 \text{ atm})}{(0.7302 \text{ ft}^3 \text{ atm}/\text{lb-mol}^\circ\text{R})(537^\circ\text{R})} \\ &= 0.162 \text{ lb}_m/\text{min}. \end{aligned}$$

