AULA 17

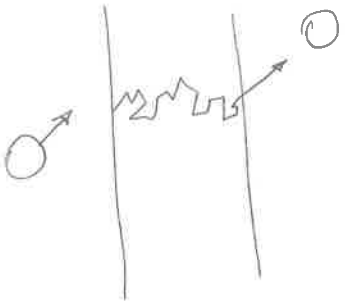
Fontes de gases de um sistema de vácuo

Ref. J. O'Hanlon - A user's guide to vacuum technology
G. Lewin - Fundamentals of vacuum technology
Roth - Vacuum technology

MOSTRAR TRANSPARÊNCIAS

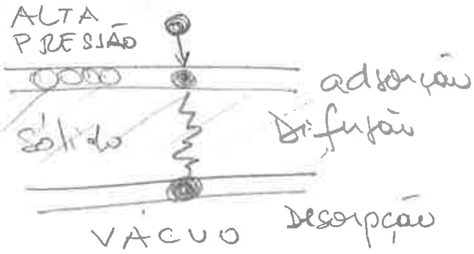
Permeação de gases

Roth cap. 4



1. Adsorção do gás pela superfície onde a pressão é alta

Depois de ser adsorvido o gás se dirige para o gradiente de concentração e difunde para o lado da superfície onde tem vácuo e é "desorbido"



Gases diatômicos: A molécula se divide durante a passagem, mas se recombina no volume

Pequenas concentrações: Os gases usualmente se dissolvem em sólidos de acordo com a lei de Henry

$$\boxed{C = s.P^{n}}$$

Físico/químico
Wilhan Henry (botânico) 1775 - 1836

$$\boxed{C = s\,P^n}$$

$C \equiv$ concentração
$s =$ solubilidade
$P =$ pressão do gás

$$\begin{cases} n = 1 & \text{para todos os gases em não-metais} \\ n = 1/2 & \text{gases diatômicos em metais.} \end{cases}$$

$[C] \equiv$ Torr ou atm

$$[s] \equiv \begin{cases} n = 1 & \text{sem dimensão} \\ n = 1/2 & 1/\sqrt{atm} \end{cases}$$

C é a quantidade de gás em Torr cm^3 ou atm cm^3 em $T = 293\,K$ que é dissolvido em 1 cm^3 da substância

s é a quantidade de gás $\underline{\text{em } cm^3}$ nas CNTP que está dissolvido em 1 cm^3 do material em uma pressão $\underline{P = 1\text{ atm}}$.

Se existir uma diferença de pressão, o gás difunde no estado estacionário de acordo com a Lei de difusão dada pela 1ª lei de Fick.

No regime estacionário
(1ª lei de Fick)

Adolf Fick (1855)
(1829 - 1901)
fisiologista alemão

$$\boxed{Q = -D\,\frac{dc}{dx}}$$

Q é o fluxo de gás através de uma área transversal unitária.

O sinal negativo é devido ao fato do fluxo ser oposto ao gradiente de concentração.

$Q \equiv$ throughput por unidade de área $\frac{\text{Torr}\,\ell}{\text{s}\,\text{cm}^2}$ [q]

D é o coeficiente de difusão $[D] = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$

A constante de difusão diminui exponencialmente com a temperatura

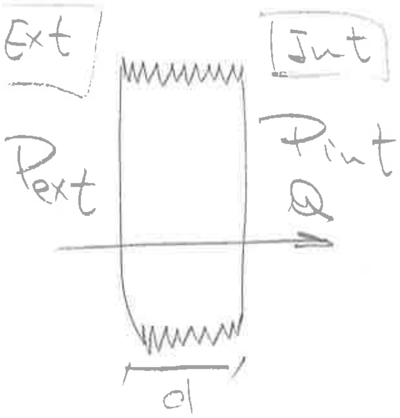
$$\boxed{D = D_0\, e^{-E/RT}}$$

E é a energia de ativação por difusão e é usualmente expressa em $\frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

R é a constante universal dos gases

D_0 é uma constante de proporcionalidade

Vamos considerar uma seção reta de área unitária dentro de uma parede muito extensa, com espessura d e pressões P_1 e P_2 em suas faces.



As concentrações nas superfícies podem ser descritas por:

$$C_1 = s\,P_1^{n} \quad e \quad C_2 = s\,P_2^{n}$$ Lei de Henry

Como $Q = -D\dfrac{dc}{dx}$, então 1ª lei de Fick

$$Q\int_0^d dx = -D\int_{c_1}^{c_2} dx \longrightarrow Qd = -D(c_2 - c_1)$$

substituindo a lei de Henry

$$Q = \frac{D}{d}(c_1 - c_2) \Longrightarrow \boxed{Q = \frac{Ds\,(P_2^{n} - P_1^{n})}{d}}$$

Ds é a constante de permeação K

$$\boxed{D_s = K(T)}$$

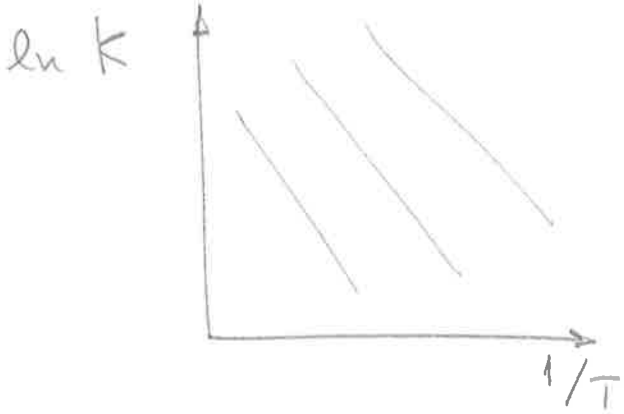
K é expresso como a quantidade de gás, em cm^3 nas CNTP, que difunde através de uma área em uma parede de espessura 1 cm para uma diferença de pressão de 1 atm.

$$K = K_0 \, e^{-E/RT}$$

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{E}{RT}$$ reta $y = a - bx$

Mostrar transparência

gráfico de $\ln K$ em função de $1/T$



para diferentes gases permeando em diferentes materiais.

Unidades de K

para $n = 1$ — Todos os gases em não metais

$K\left(\frac{cm^2}{s}\right)$ $\quad Q\left(\frac{cm^3\,atm}{s\,cm^2}\right)$

para $n = 2$ — gases diatômicos em metais

$K\left(\frac{cm^2\sqrt{atm}}{s}\right)$ $\quad Q\left(\frac{cm^3\,atm}{s\,cm^2}\right)$

Transformação de unidades

$cm^3 \longrightarrow l$

$atm \longrightarrow Torr$

$$Q\left(\frac{Torr\;l}{s\;cm^2}\right)$$

Exemplo 1 N_2 em Neoprene

$n = 1$ gás em não metal

$$Q = \frac{K\,(P_{ext} - P_{int})}{d}$$

dados $T = 330K$ $P_{ex} = 700\,Torr$

$d \sim 0{,}3\,cm$ $P_{ex\,N_2} = 80\%$

Pelo gráfico da curva 18 pag 27 G. Lewin

$$\frac{10^3}{T} \sim \frac{1000}{330} \sim 3 \qquad K = 10^{-7}\,\frac{cm^2}{s} \;;\; n = 1$$

$P_{ext} = 80\%(700)\,Torr$ $\boxed{P_{ext\,N_2} = 560\,Torr}$

$$Q = \frac{10^{-7}(560)}{0{,}3}\,\frac{cm^2\,Torr}{s\;cm}$$

$$Q = 1{,}9 \times 10^{-4}\,\frac{Torr}{s}\,\frac{cm^3}{cm^2}$$

$$Q = 1{,}9 \times 10^{-4}\,\frac{Torr}{s}\,\frac{10^{-3}\,l}{cm^2} \Longrightarrow \boxed{Q' = q = 1{,}9 \times 10^{-7}\,\frac{Torr\,l}{s\,cm^2}}$$

Supondo um tubo de neoprene de $D = 1''$ (2,5 cm) e $L = 100\,cm$

$$\text{Área} = \pi D L = \pi(2{,}5)100 = 785\,cm^2$$

$$Q = qA = 1{,}9 \times 10^{-7} \times 785 \Longrightarrow \boxed{Q = 1{,}5 \times 10^{-4}\,\frac{Torr\,l}{s}}$$

Suponha uma bomba com $S \sim 100\,l/s$

$$P_{res} = \frac{Q}{S} = \frac{1{,}5 \times 10^{-4}}{100} = 10^{-6}\,Torr$$

conclusão:

Não usar esses tubos em sistemas de alto vácuo!!

(b) Qual o diâmetro do furo equivalente?

(VAZAMENTO)

$Q = C\Delta P$

$1{,}5\times10^{-4} = C\,(P_{ext} - \cancel{P_{int}})$

$1{,}5\times10^{-4} = C\,P_{ext}$

$C = \dfrac{1{,}5\times10^{-4}}{560}$ $\qquad C = 15D^2$ para o regime viscoso

$15D^2 = \dfrac{1{,}5\times10^{-4}}{560}$

$$\boxed{D \sim 1{,}3\times10^{-4}\ \text{cm}}$$

O vazamento de um orifício dessas dimensões é equivalente ao se usar um tubo de neoprene de $D = 1''$ e $L = 100$ cm

EXEMPLO 2: N_2 em câmara de Fe

Nesse caso $n = 1/2$ gás diatômico em metais

espessura de uma câmara de Fe $\boxed{d \sim 0{,}2\,cm}$

Para estimar o valor de K ($k = Ds$) devemos extrapolar a curva 4 do gráfico 3-3 pag 28 G. Lewin

pelo menos: $K = 10^{-12} \dfrac{cm^2\,atm^{1/2}}{s}$ $\qquad \dfrac{10^3}{T} \sim \dfrac{1000}{330} \cong 3$

$$Q = k\left(P_{ext}^{1/2} - P_{int}^{1/2}\right) = \frac{10^{-12}\,P_{ext}^{1/2}}{d}\;\frac{cm^2\,atm^{1/2}}{s}\;\frac{atm^{1/2}}{cm}$$

80% N_2 $\quad$ 1 atm — 760 Torr
$\quad$ x — 560 Torr $\qquad \boxed{P_{ext} = 0{,}74\,atm}$

$$q = Q' = \frac{10^{-12}(0{,}74)^{1/2}}{0{,}2} \Rightarrow Q' = 4{,}3\times10^{-12}\,\frac{cm^3\,atm}{s\;\;cm^2}$$

Mudança de variáveis

$$q = Q' = 4{,}3\times10^{-12}\,\frac{cm^3\,atm}{s\;\;cm^2} = \frac{4{,}3\times10^{-12}(10^{-3}\ell)\,760\,Torr}{s\;\;cm^2}$$

$$\boxed{Q' = q = 3{,}3\times10^{-12}\,\frac{Torr\;\ell}{s\;\;cm^2}}$$

Supondo uma câmara esférica de D=20cm

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (20)^2}{4} = 1200\ cm^2$$

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S} = \frac{q A}{S} = \frac{3,3\times10^{-12}}{S} \frac{Torr\,l}{s\,cm^2} \times 1200\ cm^2$$

$$\boxed{P_{res} = \frac{4,1\times10^{-9}}{S}}$$

Se a bomba for de $S_b = 100\,l/s$ então

$$\boxed{P_{res} = 4,1\times10^{-11}\ Torr}$$

Conclusão: Usar sempre metal

Evita ferro fundido

(6) Diâmetro do orifício equivalente

$$Q = C\Delta P \qquad Q = 10^{-9}\ \frac{Torr\,l}{s}$$

$$10^{-9} = 15D^2(560)$$

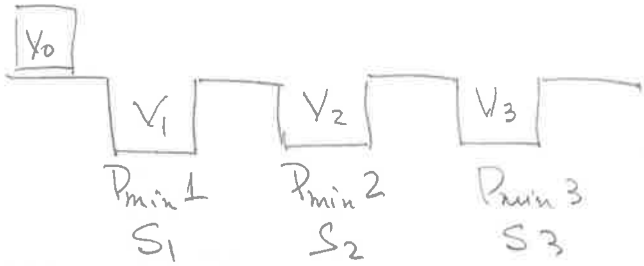
ou

$$9D^2$$

$$\boxed{D \sim 10^{-7}\ cm}$$

$$\boxed{D \sim 10\,\mathring{A}}$$

Deposito de Vacuo



Esse sistema é usado para atingir pressões baixas em pouco tempo

Suposição $\dfrac{6 \text{ recipientes}}{\text{min}} \longrightarrow 1 \text{ recipiente}/10\,s$

$V = V_0 + V_1$

Qual o valor equivalente de S_1, S_2 e S_3?

Desprezar o tempo de passagem entre as bombas e possíveis vazamentos

$$P = P_0\, e^{-\frac{S}{V} t} \longrightarrow \boxed{t = \frac{V}{S} \ln \frac{P_0}{P}}$$

$$S = \frac{V}{t} \ln \frac{P_0}{P}$$

$$V = V_1 + V_0$$

Ao atingir a posição de V_1, a pressão final será reduzida (7)

Lei de Boyle

$$S_1 = \left(\frac{V_0 + V_1}{10}\right) \ln \frac{P^*}{P_{min1}} \; ; \quad (V_0 + V_1) P^* = P_0 V_0 + P_{min1} V_1$$

$$S_2 = \left(\frac{V_0 + V_2}{10}\right) \ln \frac{P^{**}}{P_{min2}} \; ; \quad (V_0 + V_2) P^{**} = P^* V_0 + P_{min2} V_2$$

$$S_3 = \left(\frac{V_0 + V_3}{10}\right) \ln \frac{P^{***}}{P_{min3}} \; ; \quad (V_0 + V_3) P^{***} = P^{**} V_0 + P_{min3} V_3$$

Exemplo prático: $V_0 = 1\,l$ $\quad V = 100\,l$ $\quad P_{min} = 10^{-3}$ Torr

$$P^* = \frac{700\,1 + 10^{-3}\,100}{101} = 7 \text{ Torr}$$

$$S_1 = \left(\frac{101}{10}\right) \ln \frac{7}{10^{-3}} = 89\, l/s$$

$$P^{**} = \frac{7 \times 1 + 10^{-3}\,100}{101} = 0{,}07 \text{ Torr}$$

$$S_2 = \frac{101}{10} \ln \frac{0{,}07}{10^{-3}} = 42\, l/s$$

$$P^{***} = \frac{0{,}07 \times 1 + 10^{-3} \times 100}{101} = 2 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

$$S_3 = \frac{101}{10} \ln \frac{2 \times 10^{-3}}{10^{-3}} = 7\, l/s$$

Comparação

$V_0 = 1\,\ell$ $\qquad S = 1\,\ell/s$

$t = 10\,s$

$$\boxed{P = P_0\, e^{-\frac{S}{V}t} + P_{res}}$$

$$P = 700\, e^{-\frac{1}{1}10} + P_{res}$$

$$\boxed{P = 3\times10^{-2}\,\text{Torr} + P_{res}}$$

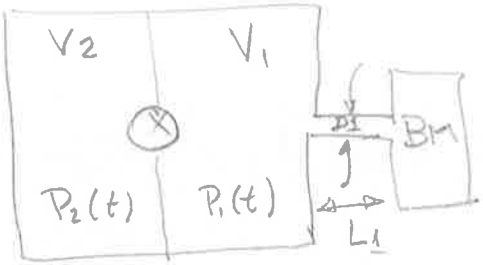
$$P = P_0\, e^{-\frac{S}{V}t}$$

$$t = \frac{V}{S}\ln\frac{P_0}{P}$$

$$t = \frac{1}{1}\ln\frac{700}{10^{-3}} \Longrightarrow \boxed{t = 13,5\,s}$$

EXERCÍCIO: P(t)

Considere um sistema de vácuo conforme a figura 1



dados

$L_1 = 60\,cm$

$D_1 = 5\,cm$

$S_b = 150\,\ell/min$

$V_1 = 10\,\ell$

$V_2 = 10\,\ell$

VÁLVULA $\begin{cases} D = 1\,mm \\ L = 40\,mm \end{cases}$

O volume V_1 é bombeado desde a pressão atmosférica pela bomba de $150\,\ell/min$. A válvula entre V_1 e V_2, mesmo fechada, se comporta como se houvesse um canal de passagem com $D = 1\,mm$ e $L = 40\,mm$

A menor pressão do sistema (Pres.) é da ordem de 10^{-4} Torr. Considere gás N_2 à temperatura ambiente.

(a) Faça o gráfico de $P_1(t)$ e $P_2(t)$ em função do tempo a partir de $P_0 = 1$ atm

(b) Qual o tempo necessário para V_1 e V_2 atingirem a pressão residual $P_{res} \simeq 10^{-4}$ Torr?

Resolução:

ⓐ $$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_{t_1}}$$

$$\begin{cases} C_{01} = 9D^2 = 9 \times 5^2 = 225\ l/s \\ C_{t_1} = 12\frac{D^3}{L} = 12\frac{5^3}{60} = 25\ l/s \end{cases}$$

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{225} + \frac{1}{25} \Longrightarrow \boxed{C_1 = 22{,}5\ l/s}$$

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{02}} + \frac{1}{C_{t_2}}$$

$$\begin{cases} C_{02} = 9D^2 = 0{,}09\ l/s \\ C_{t2} = 12\frac{D^3}{L} = 0{,}003\ l/s \end{cases}$$

$$\boxed{C_2 = 0{,}003\ l/s}$$

$$S_b = 150\ \frac{l}{min} \Longrightarrow \boxed{S_b = 2{,}5\ l/s}$$

$$S_{ef_1} = \frac{S_b C_1}{S_b + C_1} = \frac{2{,}5 \times 22{,}5}{2{,}5 + 22{,}5} = 2{,}25\ l/s$$

$$S_{ef_2} = \frac{S_b C_2}{S_b + C_2} = \frac{2{,}5 \times 0{,}0029}{2{,}5 + 0{,}0029} = 0{,}0029\ l/s$$

Vazamento VIRTUAL !!

$$P_2(t) = P_0\, e^{-\frac{S_{ef2} t}{V_2}} + P_{res} = 700\, e^{-\frac{0{,}0029 t}{10}} + P_{res}$$

$$P_1(t) = P_0\, e^{-\frac{S_{ef1} t}{V_1}} + P_{vazamento\ virtual}$$

$$P_1(t) = 700\, e^{-\frac{2{,}25 t}{V_1}} + \frac{C_V P_0}{S_{ef_1}}\, e^{-\frac{C_V}{V_2} t}$$

$$P_1(t) = 700\, e^{-0{,}225 t} + \frac{2{,}9 \times 10^{-3}\ 700}{2{,}25}\, e^{-\frac{0{,}0029 t}{10}}$$

$$\boxed{P_1(t) = 700\, e^{-0{,}225 t} + 0{,}9\, e^{-0{,}00029 t}}$$

(b) $P_1(t) = 0{,}9\, e^{-0{,}00029\, t}$ $\boxed{P_1(t) = 10^{-4}\ \text{Torr}}$

$$\ln \frac{10^{-4}}{0{,}9} = -0{,}00029\, t$$

$\therefore$ $t = 31396$ s

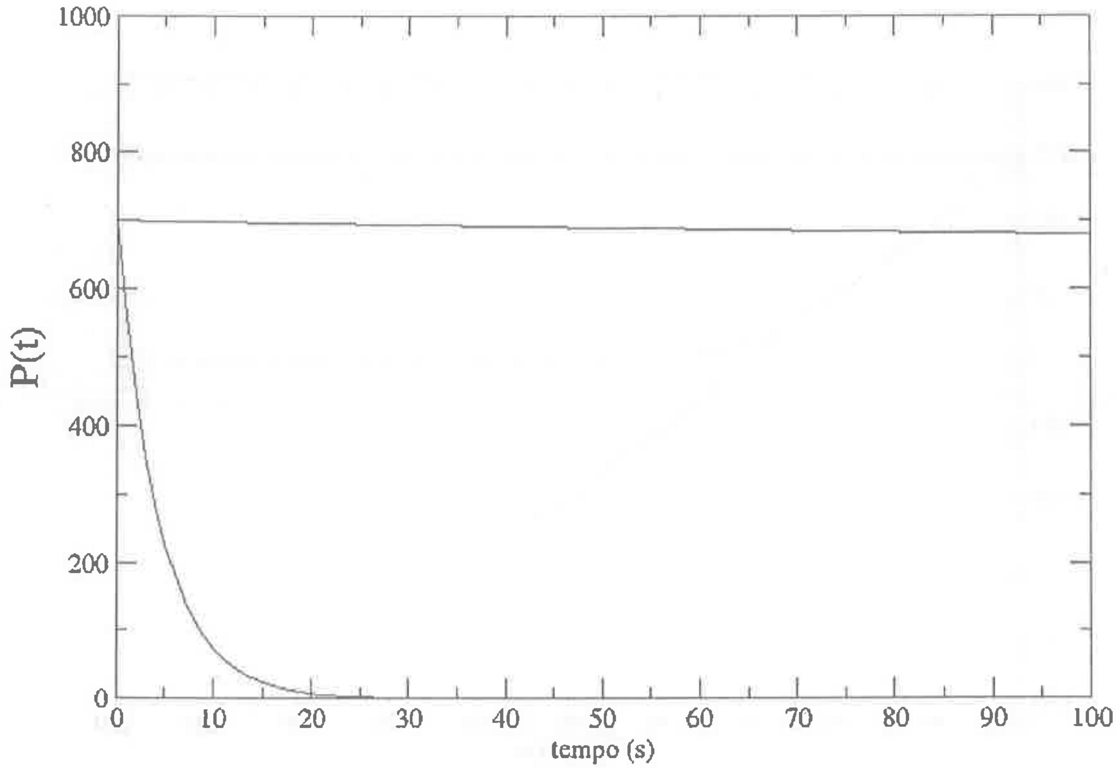
$\boxed{t \sim 8{,}7 \text{ horas}}$

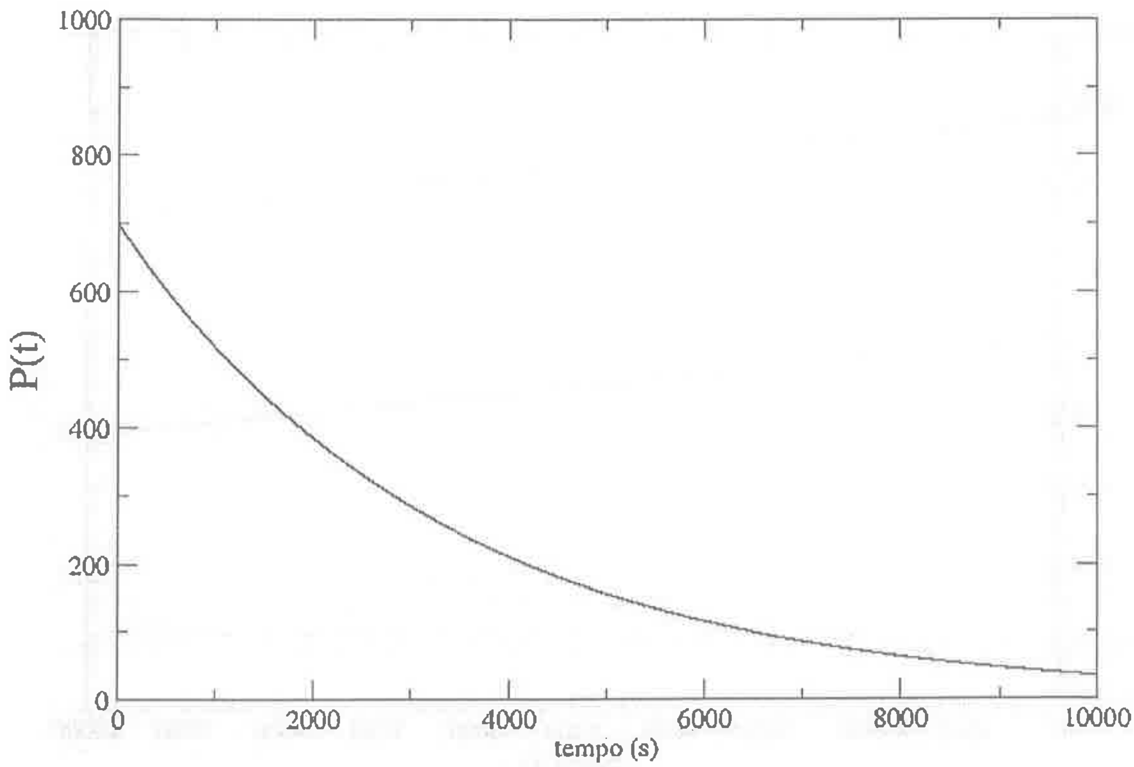
$P_2(t) = 700\, e^{-0{,}00029\, t}$ $\boxed{P_2(t) = 10^{-4}\ \text{Torr}}$

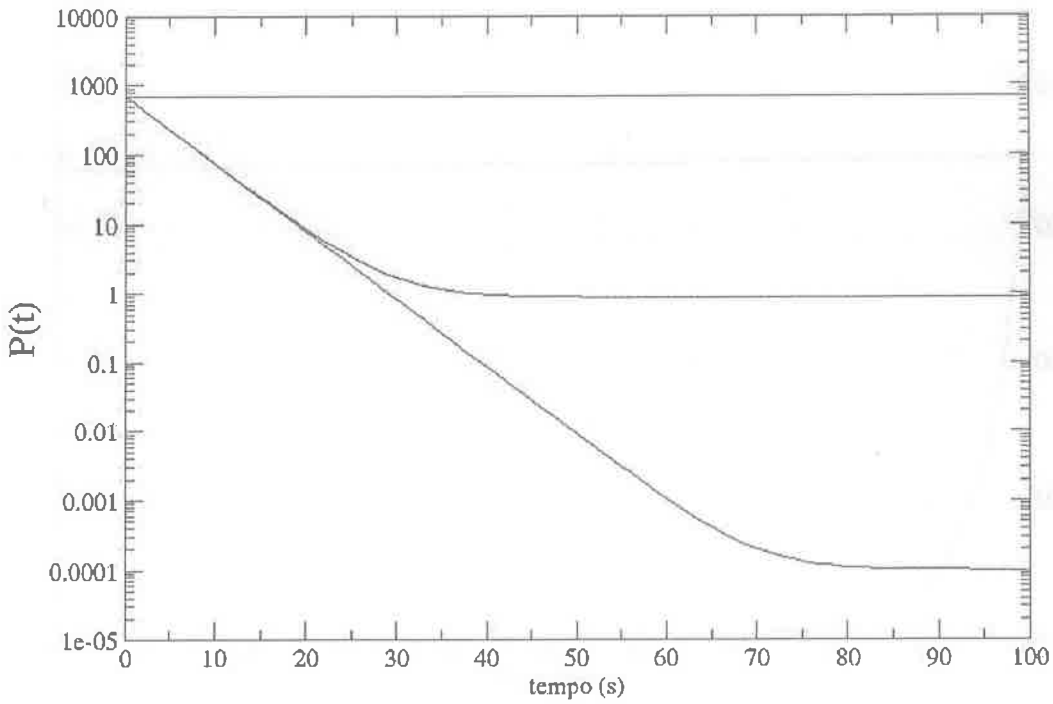
$$\ln \frac{10^{-4}}{700} = -0{,}00029\, t$$

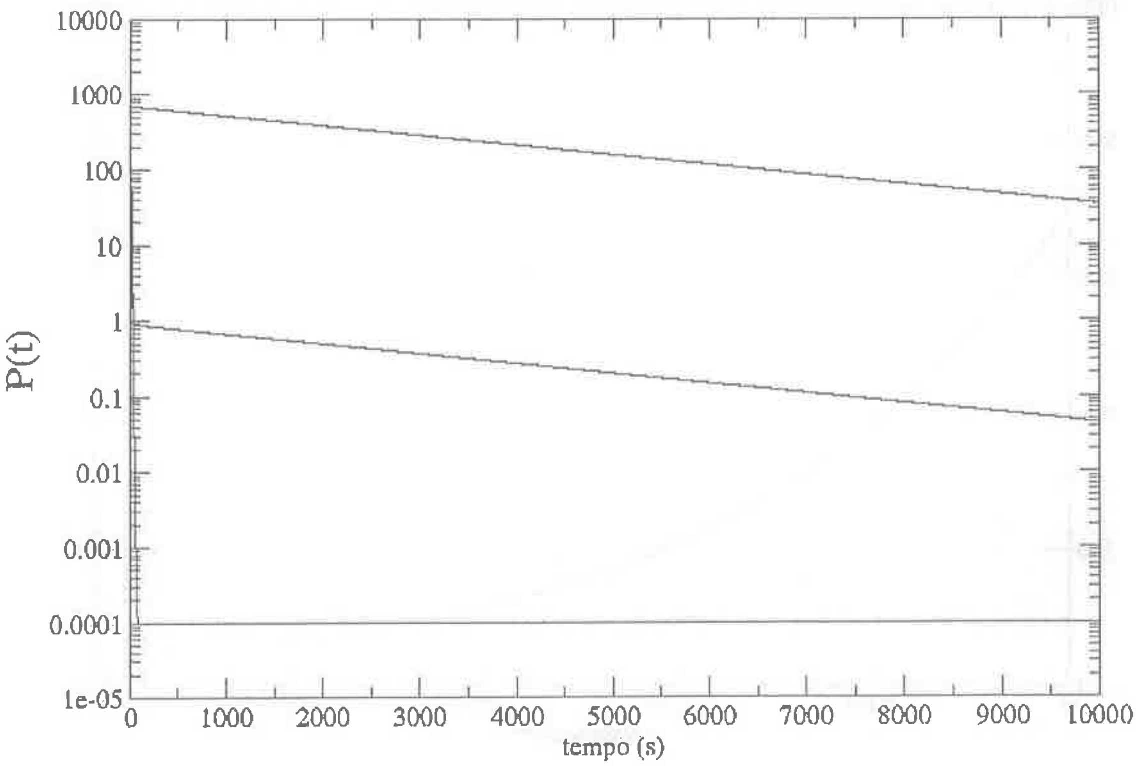
$\therefore$ $\boxed{t = 54350 \text{ s}}$

$\boxed{t = 15 \text{ horas}}$


1000
800
600
400
200
0
P(t)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
tempo (s)


1000
800
600
400
200
0
P(t)
0
2000
4000
6000
8000
10000
tempo (s)


10000
1000
100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
1e-05
P(t)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
tempo (s)


10000
1000
100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
1e-05
P(t)
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
9000
10000
tempo (s)