

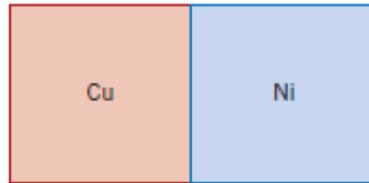
09

METALURGIA FÍSICA

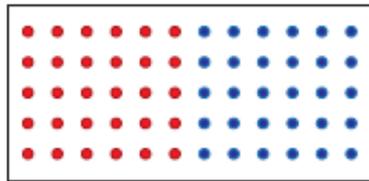
TECNOLOGIA DA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA

Tecnologia em Materiais
Prof. Luis Fernando Maffeis Martins

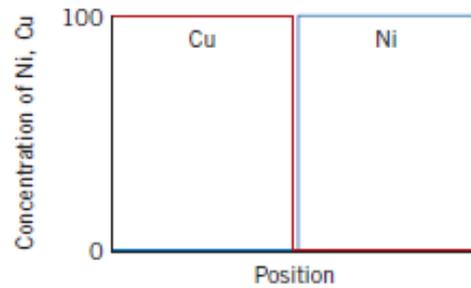
Difusão



(a)

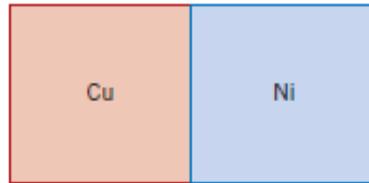


(b)

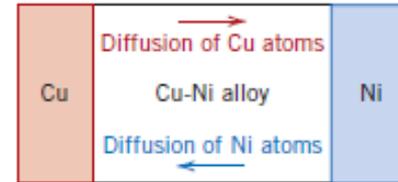


(c)

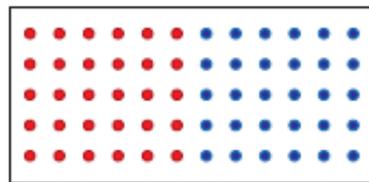
Difusão



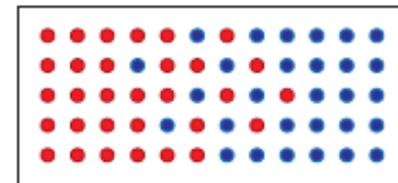
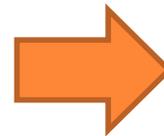
(a)



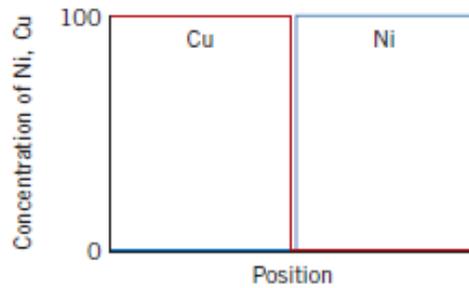
(a)



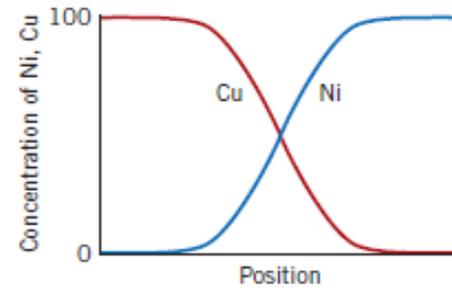
(b)



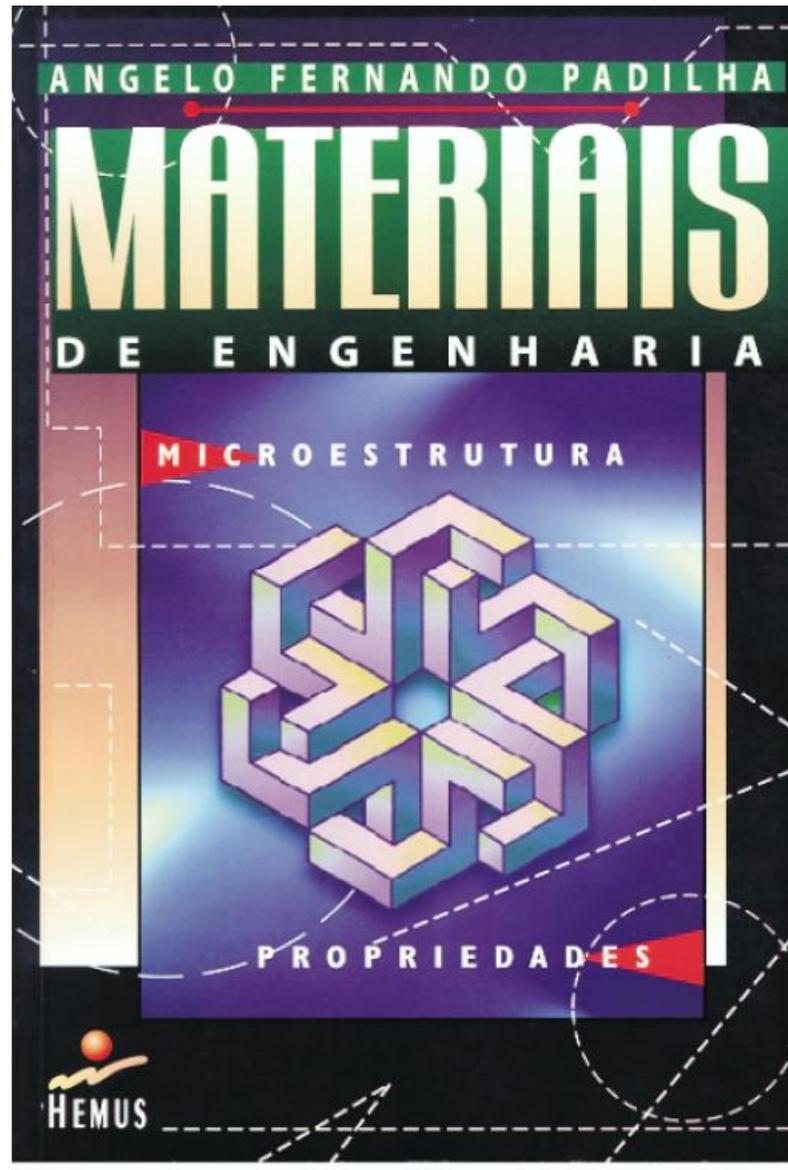
(b)



(c)



(c)



Difusão

Processos termicamente ativados

Numerosos fenômenos em ciência dos materiais ocorrem mais rapidamente quando a temperatura é aumentada. Em muitos casos, a dependência da velocidade de reação ou transformação (V) segue uma equação do tipo Arrhenius (1859-1927):

$$V = c \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

onde:

V é a velocidade da reação ou transformação;

c é uma constante;

Q é a energia de ativação;

R é a constante dos gases e

T é a temperatura absoluta.

Difusão

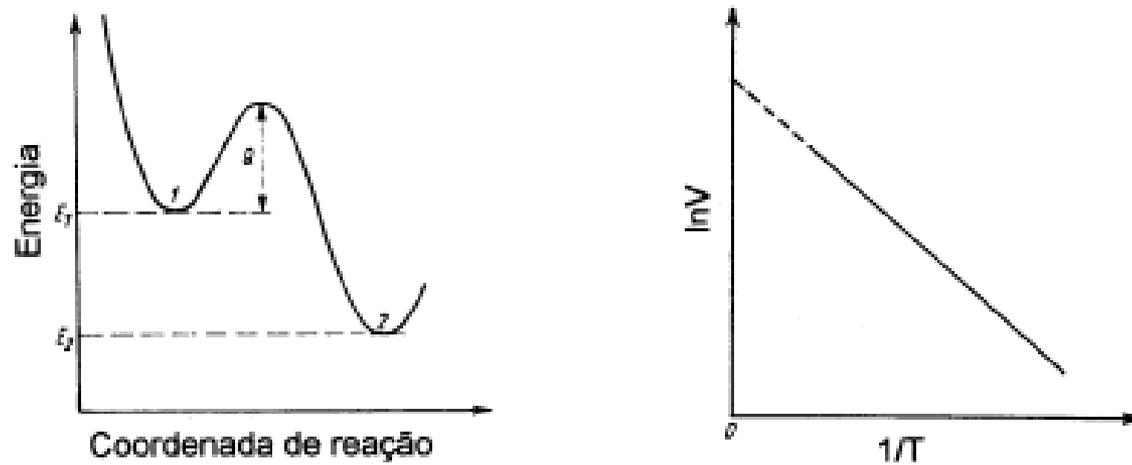


Figura 8.1 — (a) Representação esquemática de um processo termicamente ativado. (b) Apresentação da equação de Arrhenius em escalas convenientes.

Difusão

Autodifusão (difusão de um elemento em seu próprio reticulado)

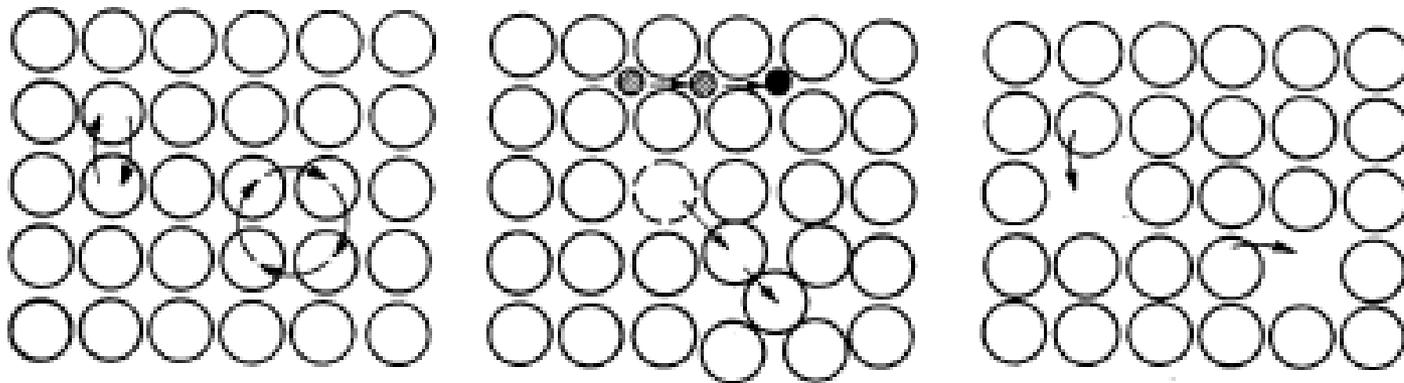


Figura 8.2 — Mecanismos de difusão em um metal.

Difusão

Difusão em soluções sólidas substitucionais

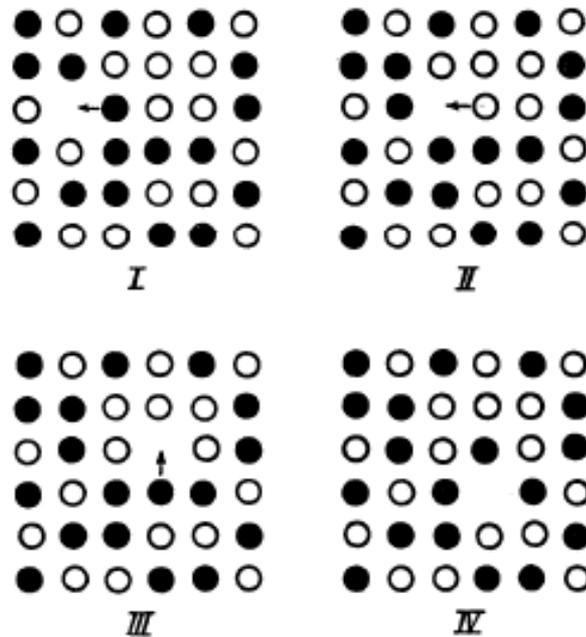


Figura 8.3 — Mecanismo de difusão em uma solução sólida por troca de lugar com lacunas.

Difusão

Difusão em soluções sólidas intersticiais

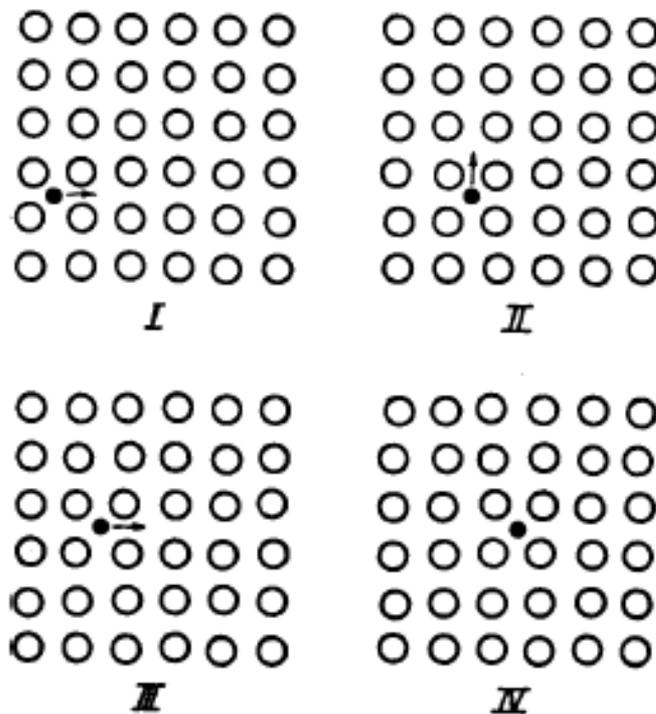


Figura 8.4 — Mecanismo de difusão intersticial.

Difusão

Difusão através de defeitos cristalinos

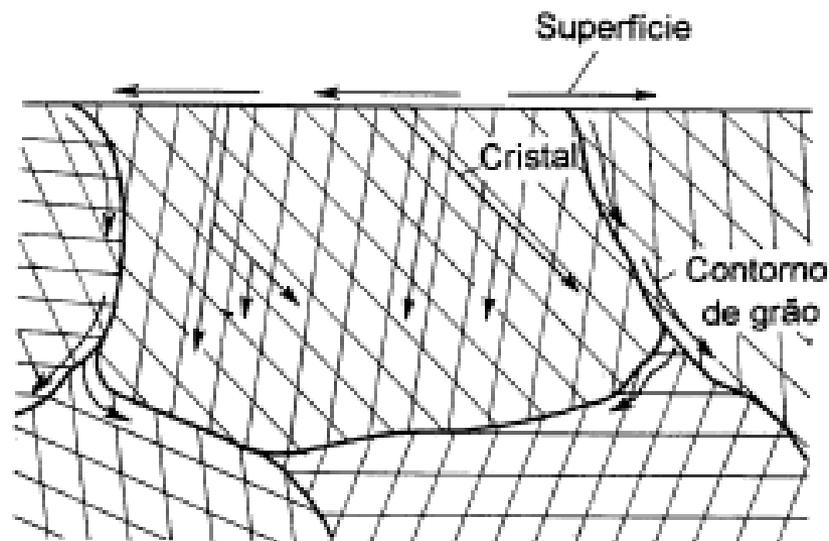


Figura 8.6 — Representação esquemática da difusão no reticulado e ao longo de defeitos.

1ª Lei de Fick

O fluxo (J , em $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) de matéria (M , em kg) que se difunde através de uma unidade de área (A , em m^2) na unidade de tempo (t , em s) é definido como:

$$J = \frac{M}{At}; \text{ ou na forma diferencial como } J = \frac{1}{A} \left(\frac{dM}{dt} \right).$$

1ª Lei de Fick

O fluxo (J , em $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) de matéria (M , em kg) que se difunde através de uma unidade de área (A , em m^2) na unidade de tempo (t , em s) é definido como:

$$J = \frac{M}{At}; \text{ ou na forma diferencial como } J = \frac{1}{A} \left(\frac{dM}{dt} \right).$$

Válida para condições estacionárias

1ª Lei de Fick

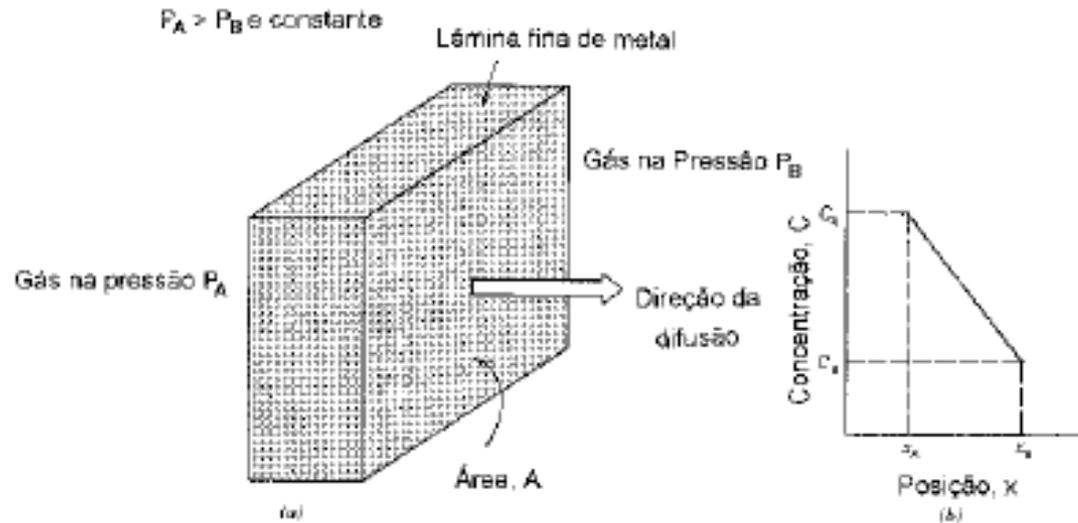


Figura 8.6 — (a) Difusão em estado estacionário através de uma placa. (b) Perfil linear de concentração na placa.

1ª Lei de Fick

A primeira lei de Fick define o fluxo J_x através da placa como sendo:

$$J_x = -D \left(\frac{dC}{dx} \right)$$

O gradiente de concentração dC/dx é neste caso igual a

$$\frac{C_A - C_B}{X_A - X_B}$$

A constante de proporcionalidade D é denominada *coeficiente de difusão* e sua unidade é m^2/s .

1ª Lei de Fick

O coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão ou difusividade D da maioria dos materiais obedece a equação de Arrhenius:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

onde

D_0 é o fator pré-exponencial independente da temperatura (m^2/s);

Q é a energia de ativação para difusão (J/mol ; cal/mol ou eV/átomo);

R é a constante dos gases ($8,31 \text{ J/mol K}$; $1,987 \text{ cal/mol K}$ ou $8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/átomo}$) e

T é a temperatura absoluta (K).

Coeficientes de difusão

Espécie Difusível	Metal Hospedeiro	Do (m ² /s)	Energia de ativação Qd		Valores calculados	
			kJ/mol	eV/átomo	T (°C)	D (m ² /s)
Fe	Fe-α (CCC)	2,8.10 ⁻⁴	251	2,60	500	3,0.10 ⁻²¹
					900	1,8.10 ⁻¹⁵
Fe	Fe-γ (CFC)	5,0.10 ⁻⁵	284	2,94	900	1,1.10 ⁻¹⁷
					1100	7,8.10 ⁻¹⁶
C	Fe-α	6,2.10 ⁻⁷	80	0,83	500	2,4.10 ⁻¹²
					900	1,7.10 ⁻¹⁰
C	Fe-γ	2,3.10 ⁻⁵	148	1,53	900	5,9.10 ⁻¹²
					1100	5,3.10 ⁻¹¹
Cu	Cu	7,8.10 ⁻⁵	211	2,19	500	4,2.10 ⁻¹⁹
Zn	Cu	2,4.10 ⁻⁵	189	1,96	500	4,0.10 ⁻¹⁸
Al	Al	2,3.10 ⁻⁴	144	1,49	500	4,2.10 ⁻¹⁴
Cu	Al	6,5.10 ⁻⁵	136	1,41	500	4,1.10 ⁻¹⁴
Mg	Al	1,2.10 ⁻⁴	131	1,35	500	1,9.10 ⁻¹³
Cu	Ni	2,7.10 ⁻⁵	256	2,65	500	1,3.10 ⁻²²

Coeficientes de difusão

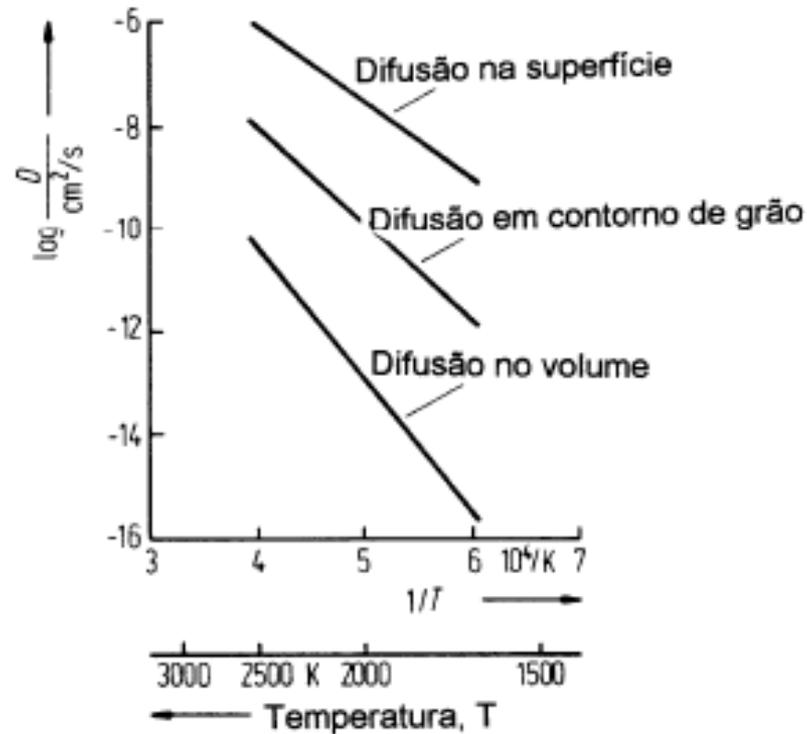
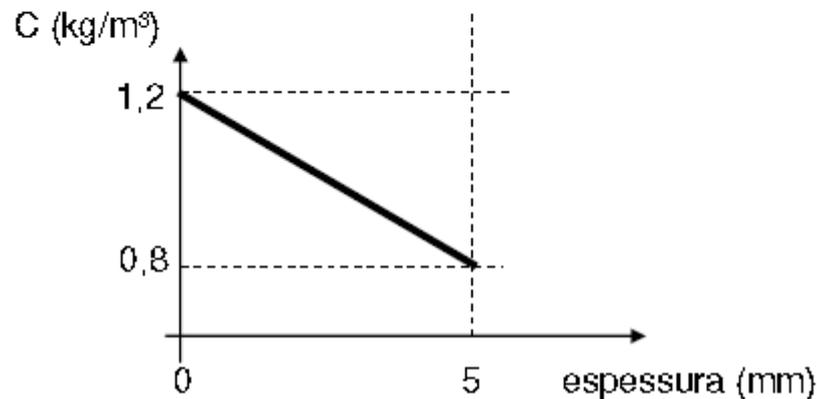


Figura 8.11 — Coeficientes de difusão do tório no tungstênio.

Exercício

Uma placa de ferro α com 5 mm de espessura, sob 700°C , é exposta numa das faces a uma atmosfera rica em carbono (chamada carbonetante) que lhe garante uma concentração de $1,2 \text{ kg/m}^3$ de carbono nesta face. Sua face oposta é mantida sob atmosfera descarbonetante, que mantém a concentração de carbono desta em $0,8 \text{ kg/m}^3$. O perfil de composições de carbono entre as faces é linear. Considerando-se atingido um estado constante de difusão, qual o fluxo de carbono pela placa?



Exercício

Primeiro, deve-se calcular o coeficiente de difusão do carbono no Fe- α a 700°C.

$$D = D_0 \times e^{\frac{-Q_D}{R.T}}$$

$$D_{C \rightarrow Fe-\alpha} = 6,2 \cdot 10^{-7} \times e^{\frac{-80000}{8,31 \cdot (700+273)}} = \underline{\underline{3,1 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}}}$$

Exercício

Segundo, calcula-se o fluxo de difusão.

$$J = -D \times \frac{dC}{dx}$$

$$J = -3,1 \cdot 10^{-11} \times \frac{1,2 - 0,8}{(0 - 5) \cdot 10^{-3}} = 2,5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

2ª Lei de Fick

Na maioria dos casos, a difusão não ocorre em condições estacionárias mas sim em condições transitórias. Em outras palavras, o perfil de concentração não é constante e varia com o tempo, conforme ilustra a figura 8.7.

Para as condições da figura 8.7, vale a seguinte equação:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Se considerarmos o coeficiente de difusão D independente da composição, a expressão acima se transforma em:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)$$

A equação acima é conhecida como *segunda lei de Fick*.

2ª Lei de Fick

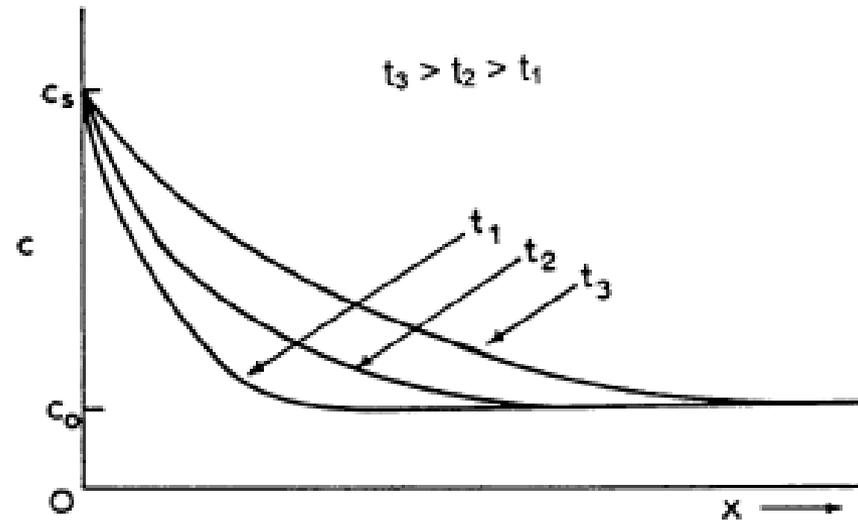


Figura 8.7 — Perfis de concentração para condições transitórias.