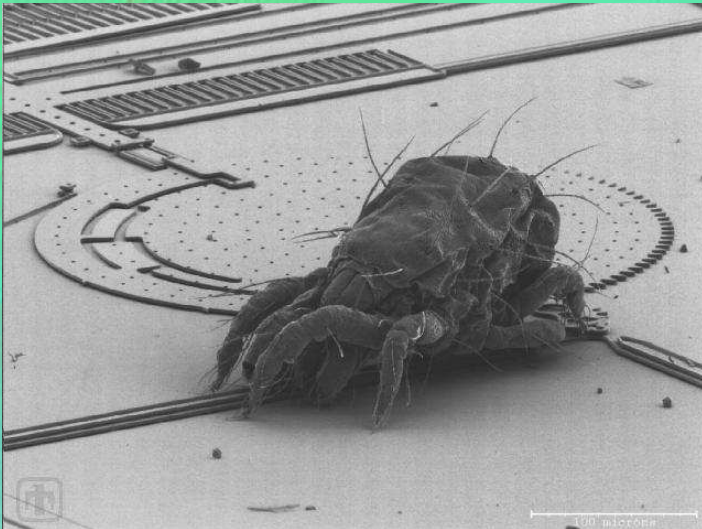


Modelado de Microsistemas



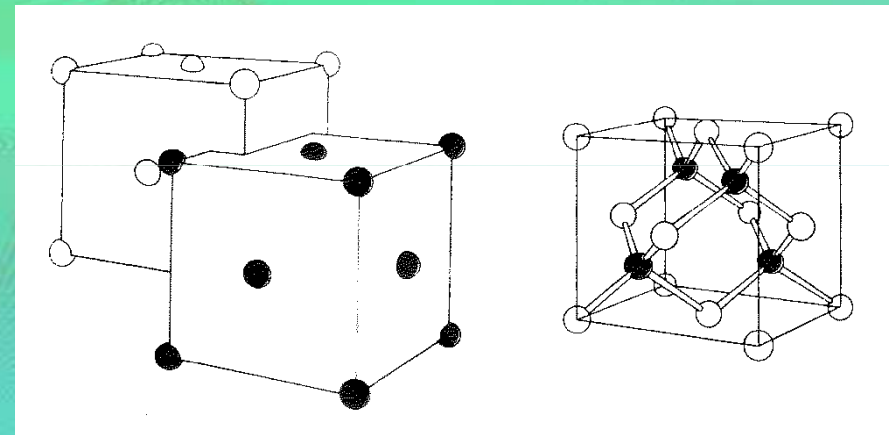
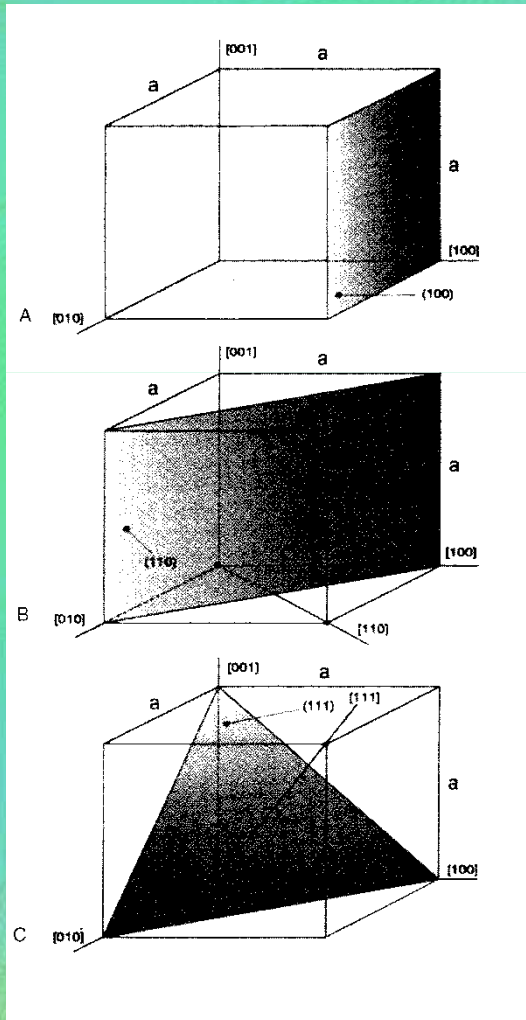
José Manuel Quero Reboul
Dpto. Ingeniería Electrónica

Índice

- Propiedades de los materiales
- Análisis de microestructuras
 - Modelado Mecánico.
 - Modelado Térmico.
 - Modelado Fluídico.
- Fuerzas en Microsistemas
 - Escalado de fuerzas
 - Valoración relativa

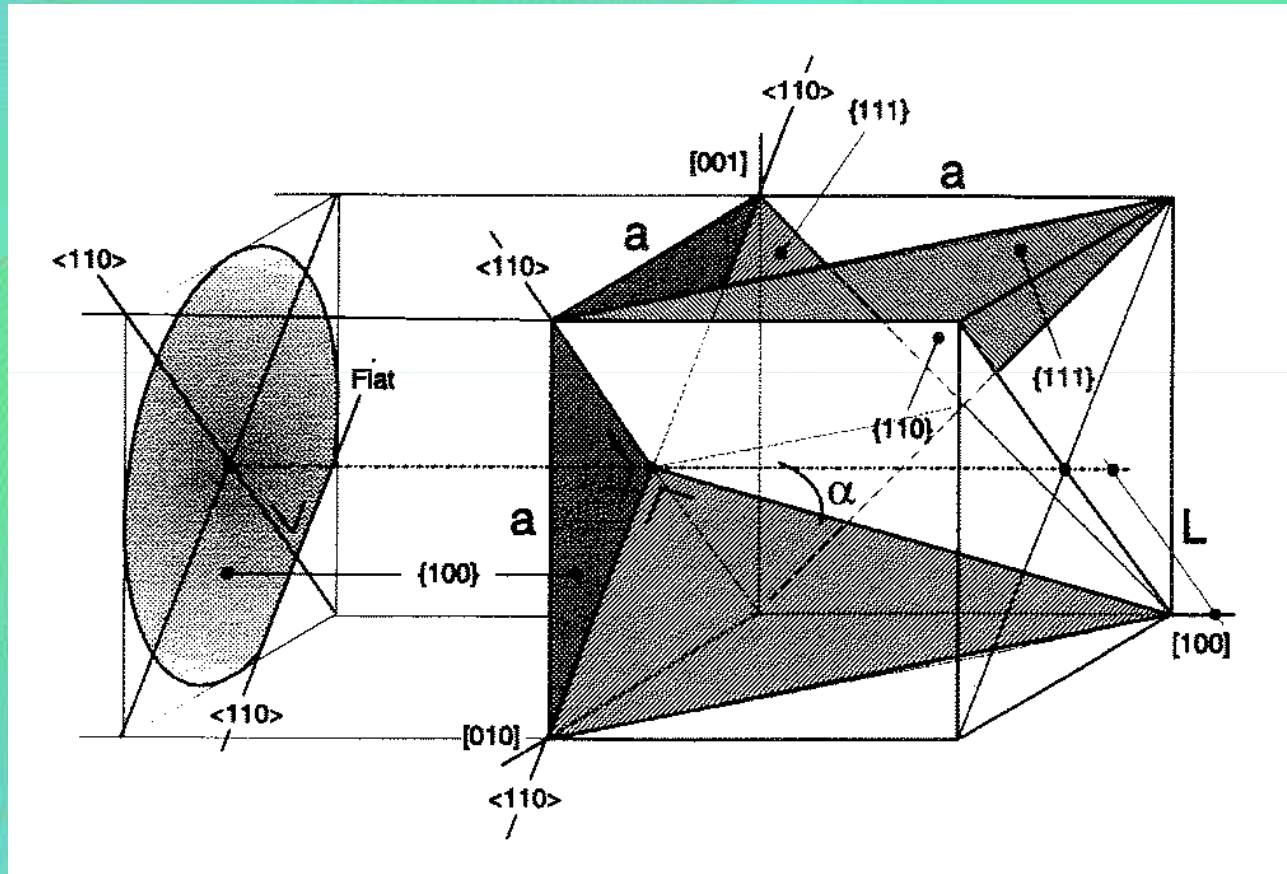
Cristalografía

Indices de Miller



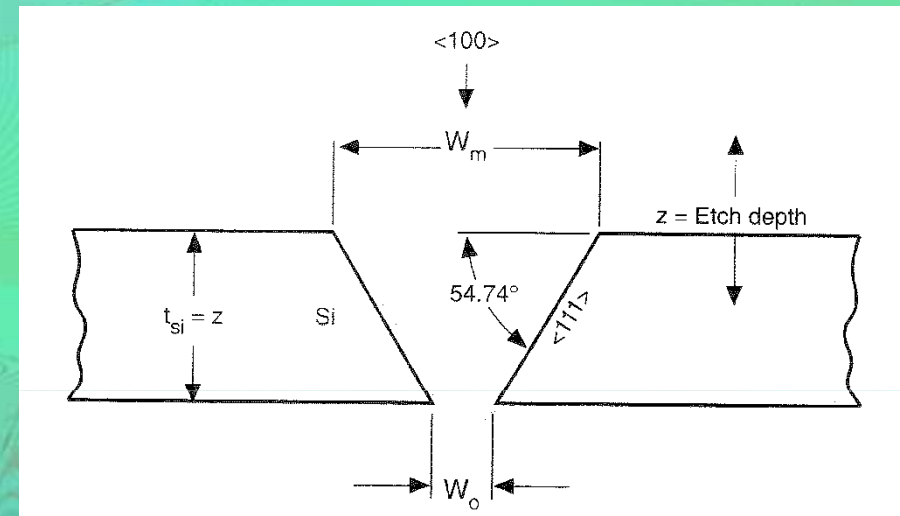
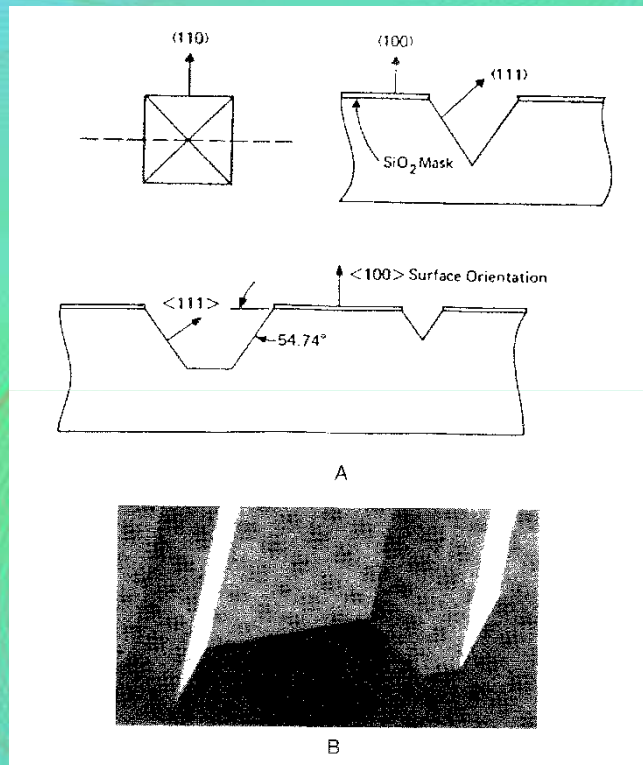
Formación de la estructura del diamante mediante la conjunción de dos estructuras centradas en caras

Cristalografía



Oblea de silicio (100) con referencia al cubo unitario

Ataques

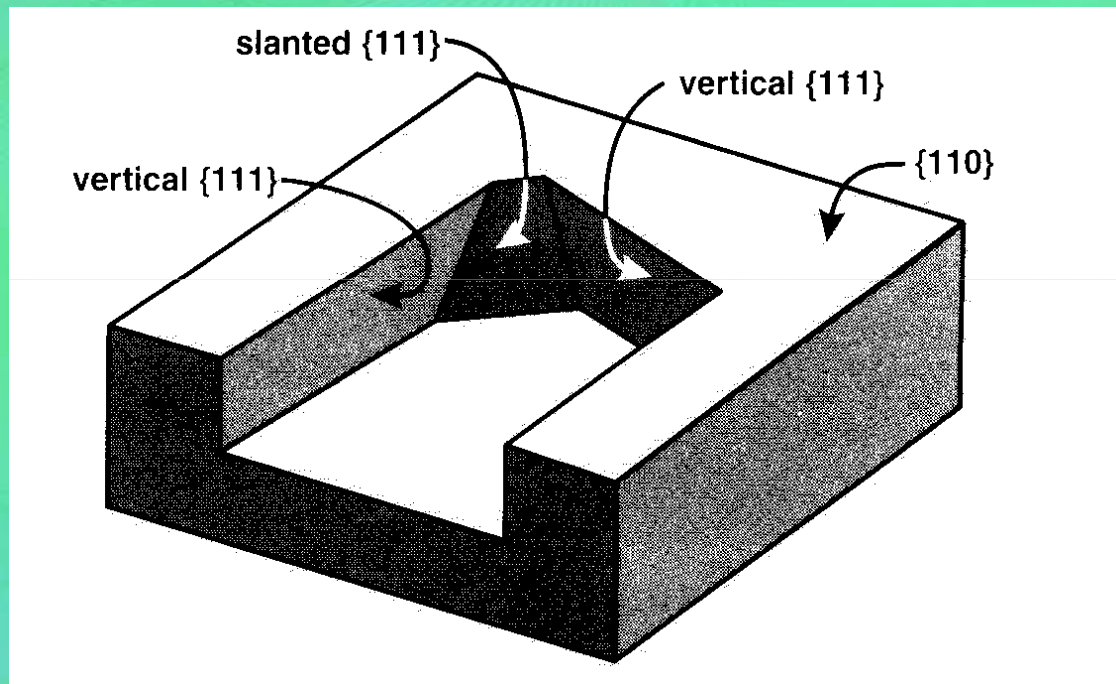


$$W_o = W_m - 2z \cos(54.74^\circ)$$



Ataque anisotrópico de una oblea de silicio
(100) con a) máscara cuadrada y B)
Máscara rectangular (microscopio de
barrido electrónico)

Ataques



Ataque anisotrópico de una oblea de silicio (110)

Ataques

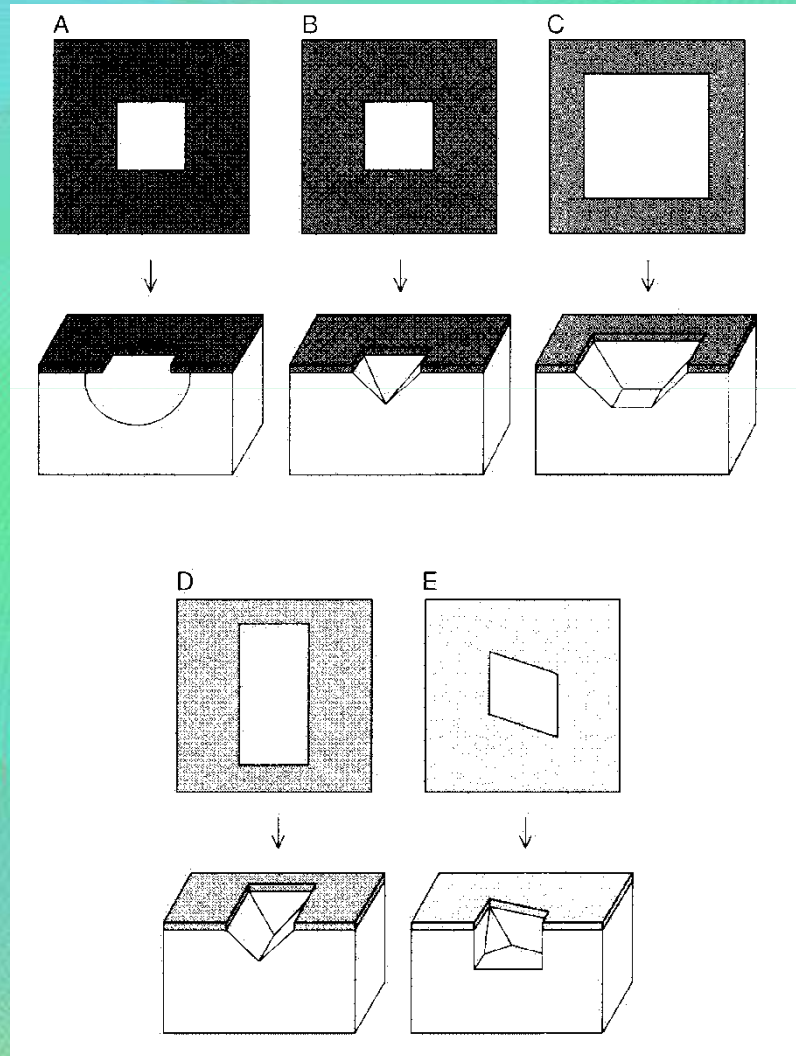
Obleas (100)

- Paredes laterales inclinadas $54^{\circ}74'$
- Elevada pérdida eficaz del orificio
- Fondo paralelo:
Membranas

Obleas (110)

- Paredes laterales múltiples
- Paredes verticales
- Membranas deficientes con tamaños difíciles de controlar

Ataques



Ataques isotrópicos y Anisotrópicos en obleas (100) y (110).

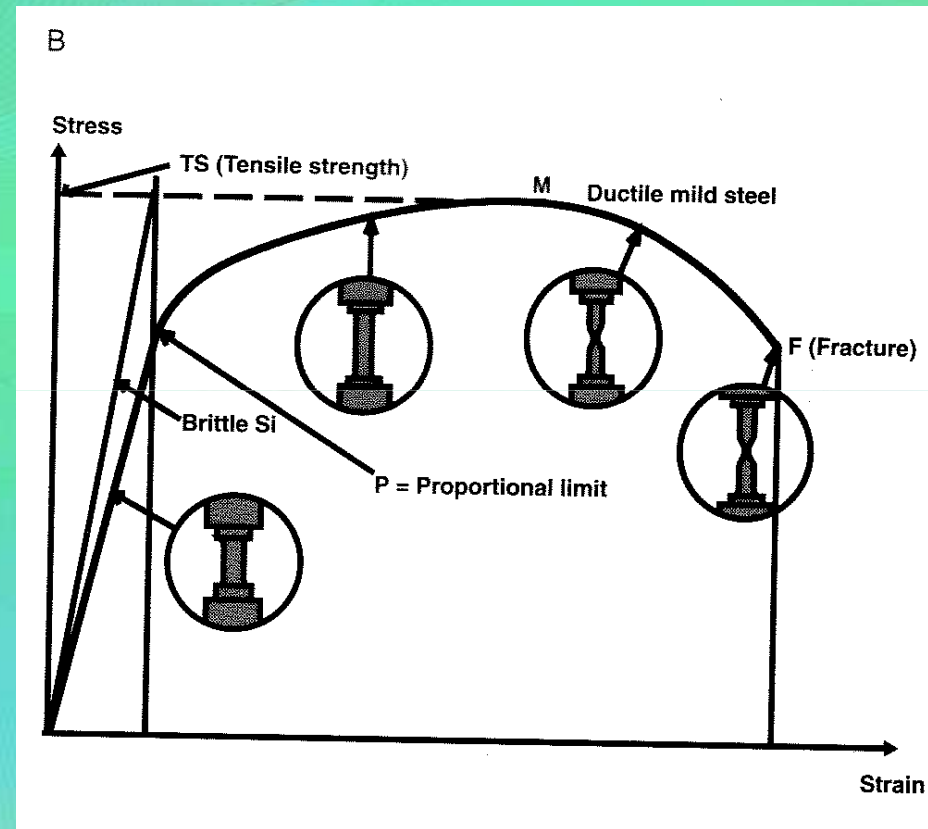
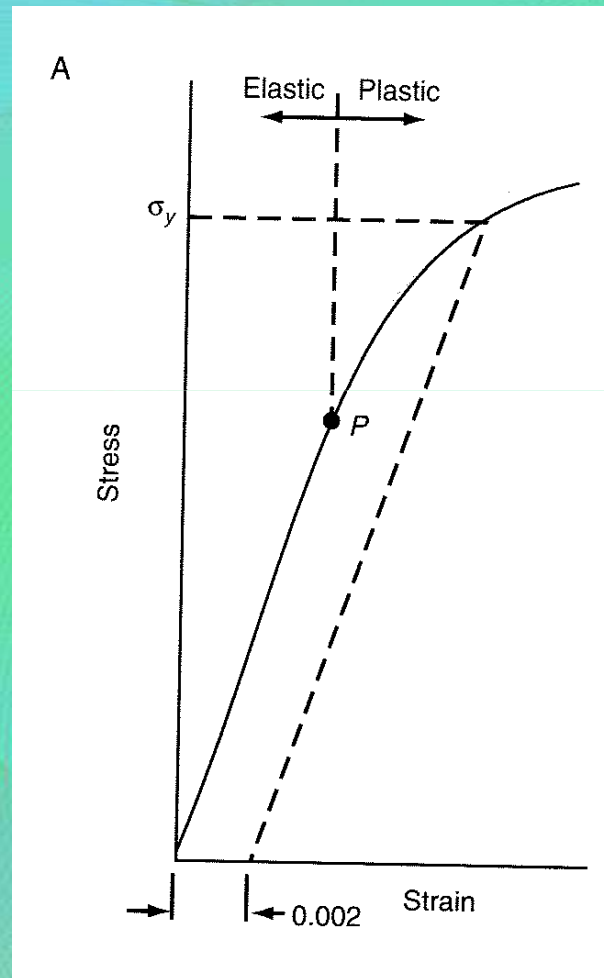
(A) Ataque isotrópico

(B) a (E) Ataque Anisotrópico

(A) a (D) obleas (100)

(E) Oblea (110)

Propiedades de los materiales



- A) Comportamiento elástico/plástico
B) Comportamiento hasta fractura

Propiedades de los materiales

Material	E (MPa)	Limite Elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)	Deformación
Diamante	1000	50000	-	0
Carburo de silicio	450	10000	-	0
Acero	196	260-1300	500-1880	0.2-0.3
Silicio	107		-	-
Oxido de Silicio	94	-		-
Aluminio	69	40	200	0,5

Problema de fracturas

Silicio:

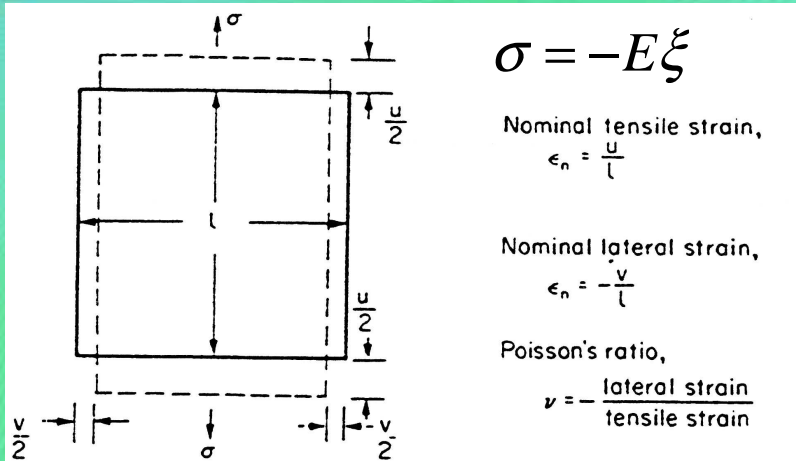
- Buenas propiedades mecánicas, químicas.
- Compatible con procesos electrónicos.
- Deficientes propiedades magnéticas.

Indice

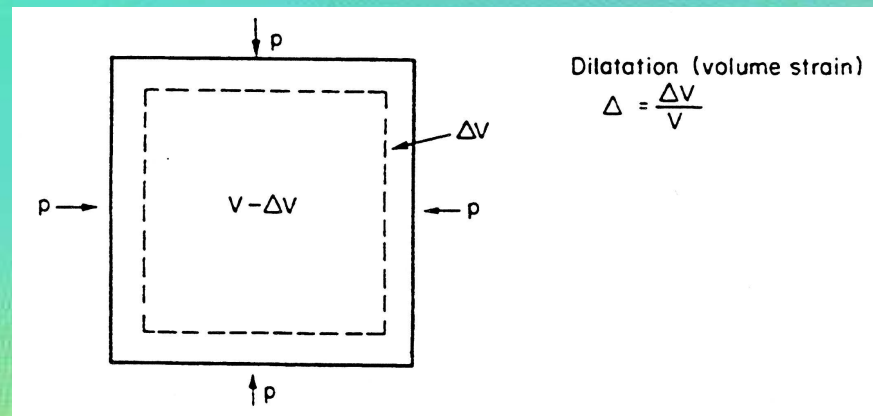
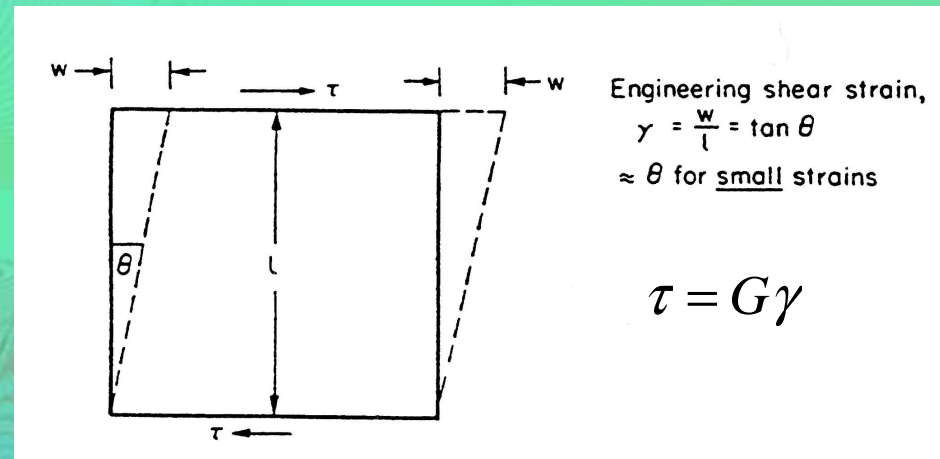
- Propiedades de los materiales
- Análisis de microestructuras
 - Modelado Mecánico.
 - Modelado Térmico.
 - Modelado Fluídico.
- Fuerzas en Microsistemas
 - Escalado de fuerzas
 - Valoración relativa

Análisis de Microestructuras

Tensión

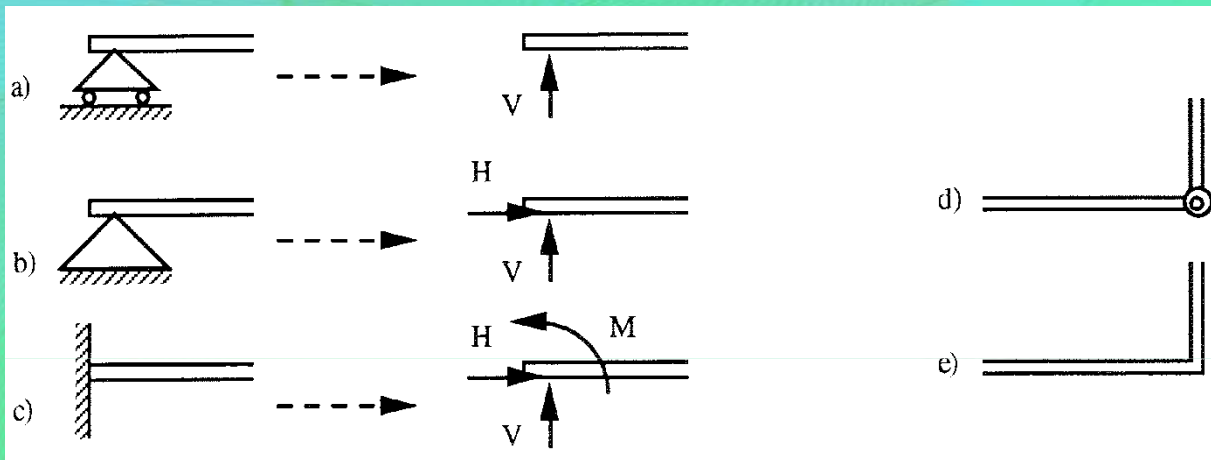


Cortante



Compresión

Estática plana

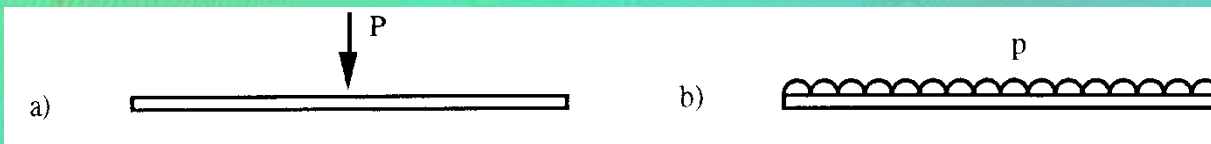


Apoyos:

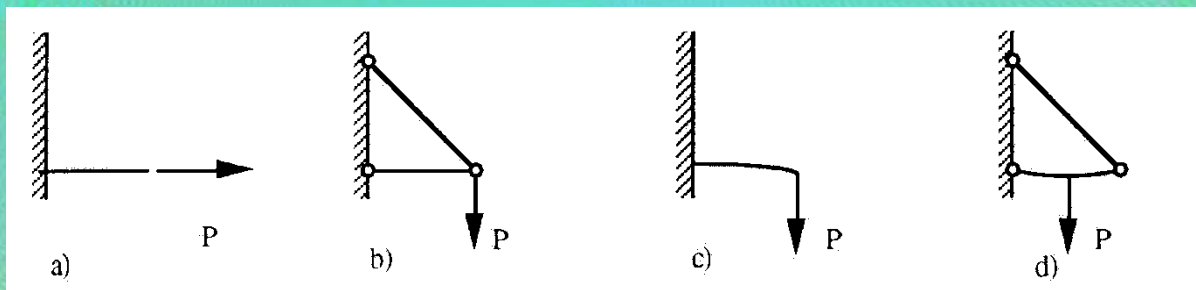
a) móvil

b) fijo

c) empotramiento

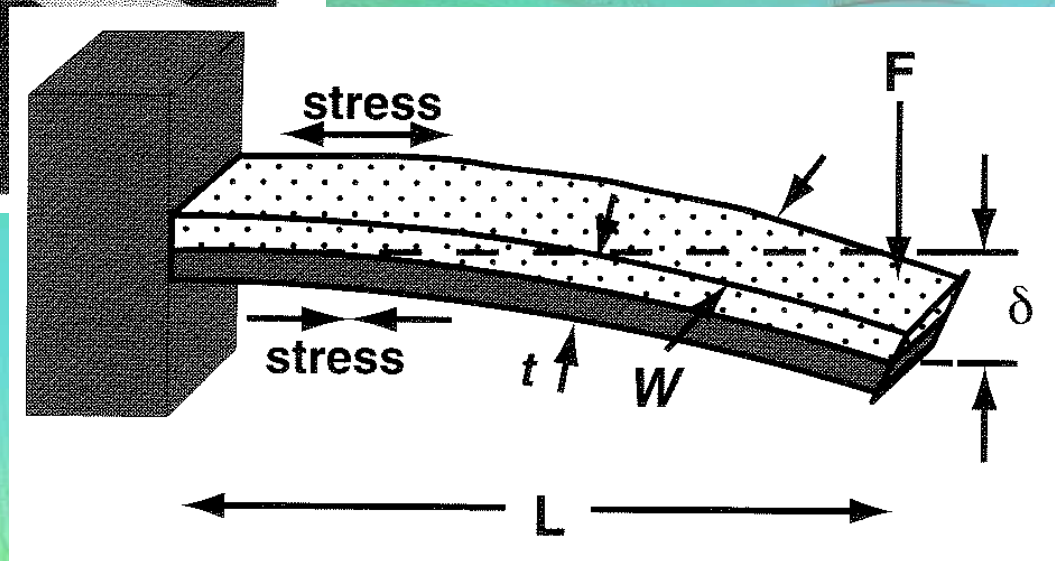
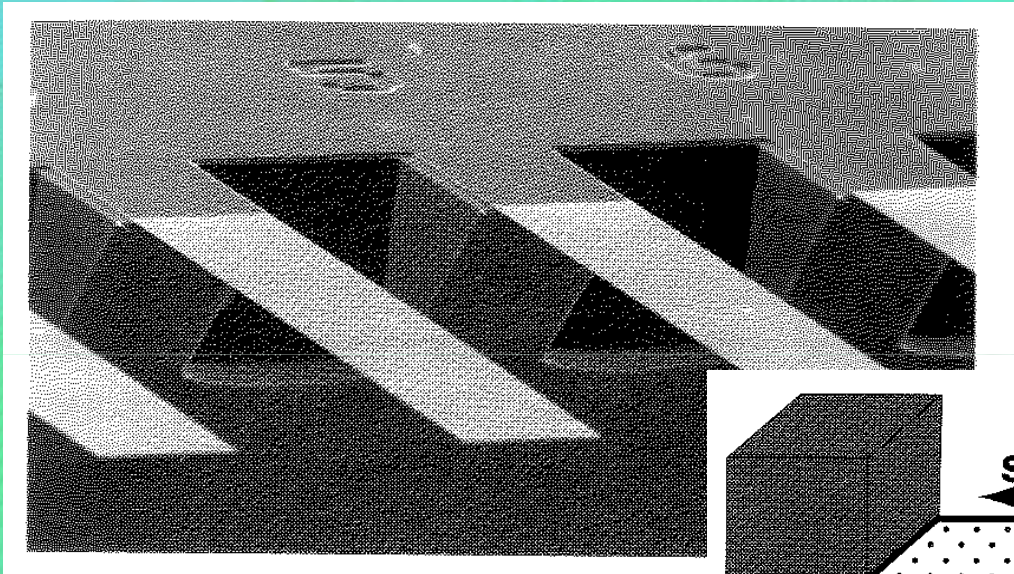


Métodos de distribución de una carga

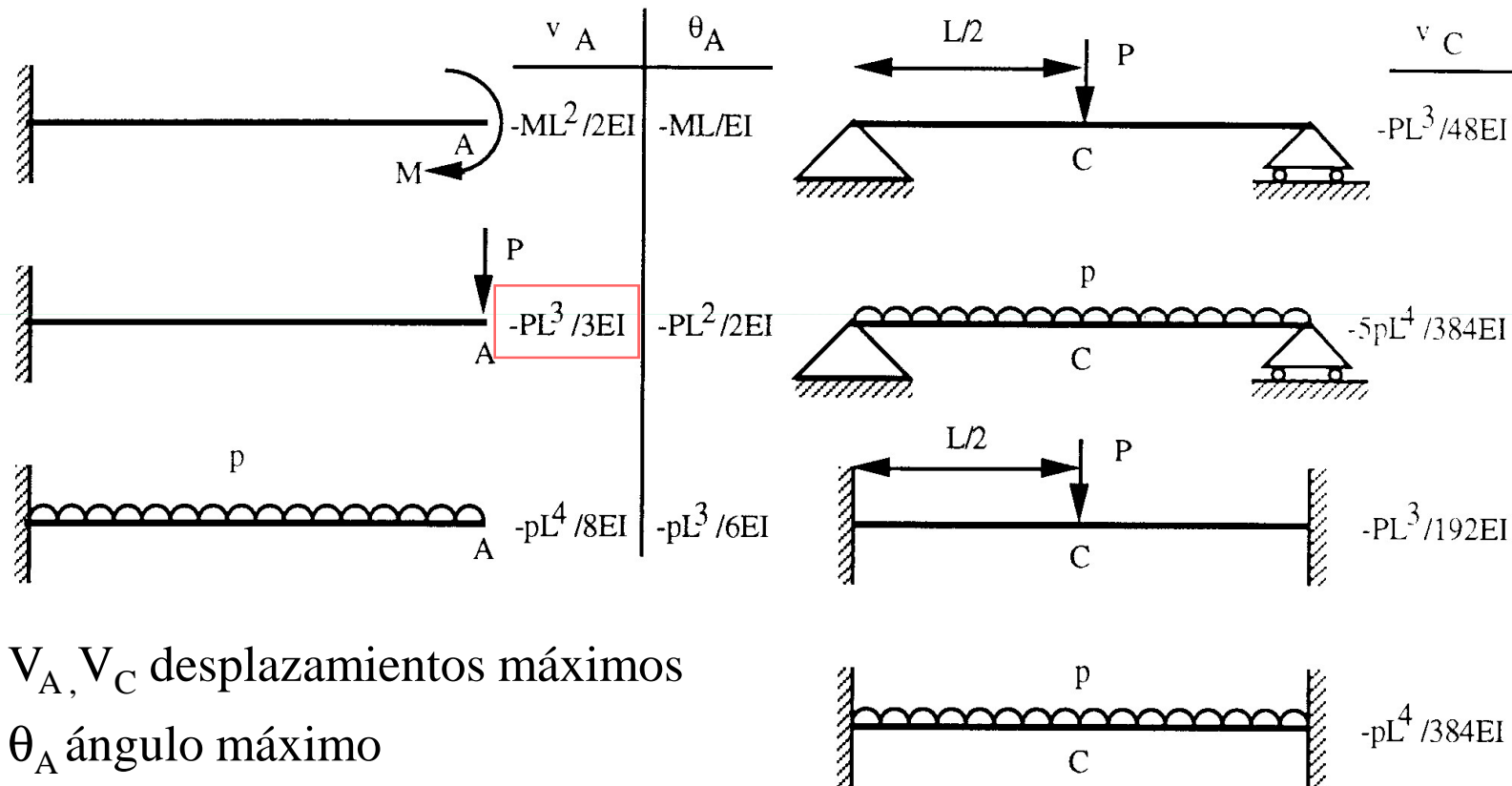


Métodos para soportar una carga

Viga empotrada y suspendida



Viga empotrada y suspendida

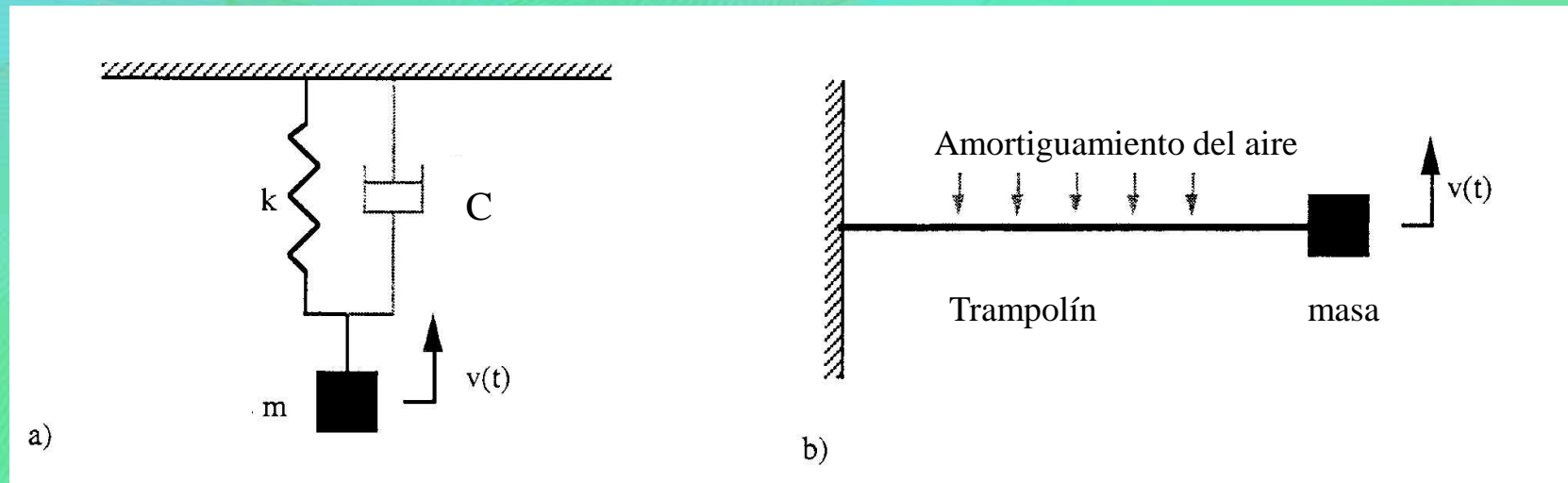


V_A, V_C desplazamientos máximos

θ_A ángulo máximo

Ejemplos de soluciones exactas

Dinámica de estructuras en vibración



reescribiendo

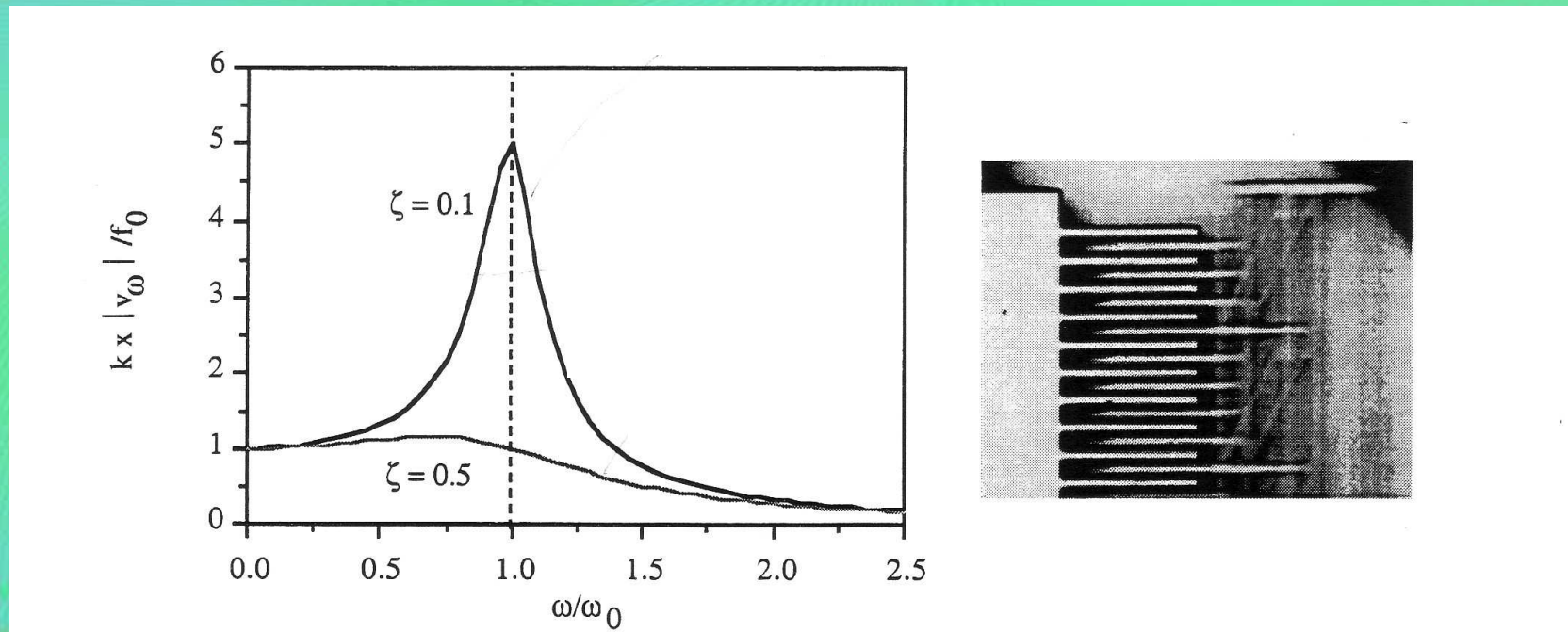
$$m \frac{d^2 v}{dt^2} = f(t) - c \frac{dv}{dt} - kv \Rightarrow \frac{d^2 v}{dt^2} = \omega_0^2 \frac{f(t)}{k} - 2\zeta \omega_0 \frac{dv}{dt} - \omega_0^2 v$$

con $\zeta = \frac{c}{2mk}$ Factor de amortiguamiento

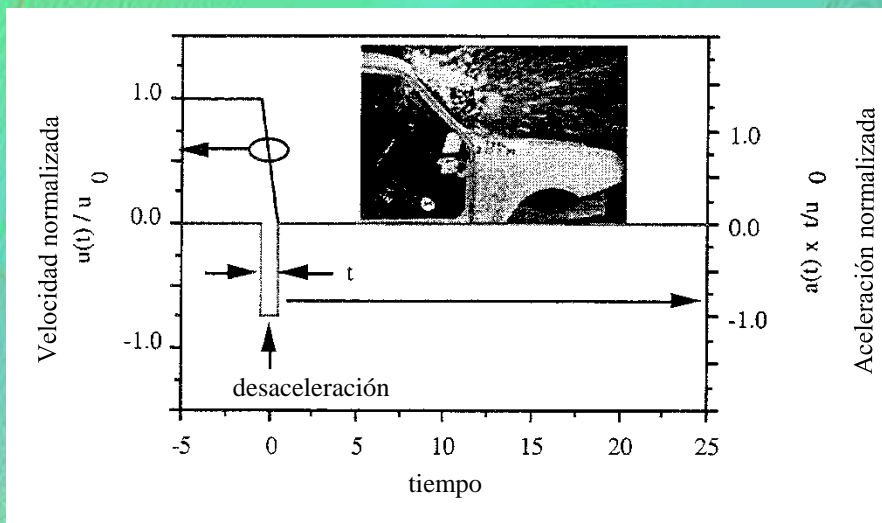
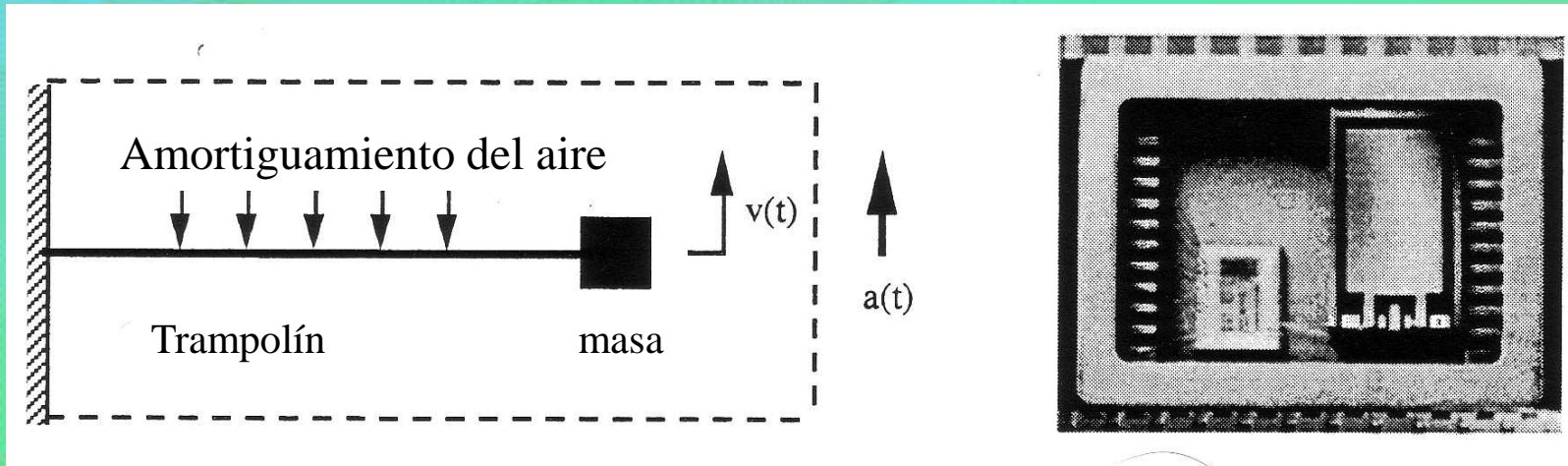
$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ Frecuencia natural

Dinámica de estructuras en vibración

Respuesta en frecuencia de un trampolín amortiguado

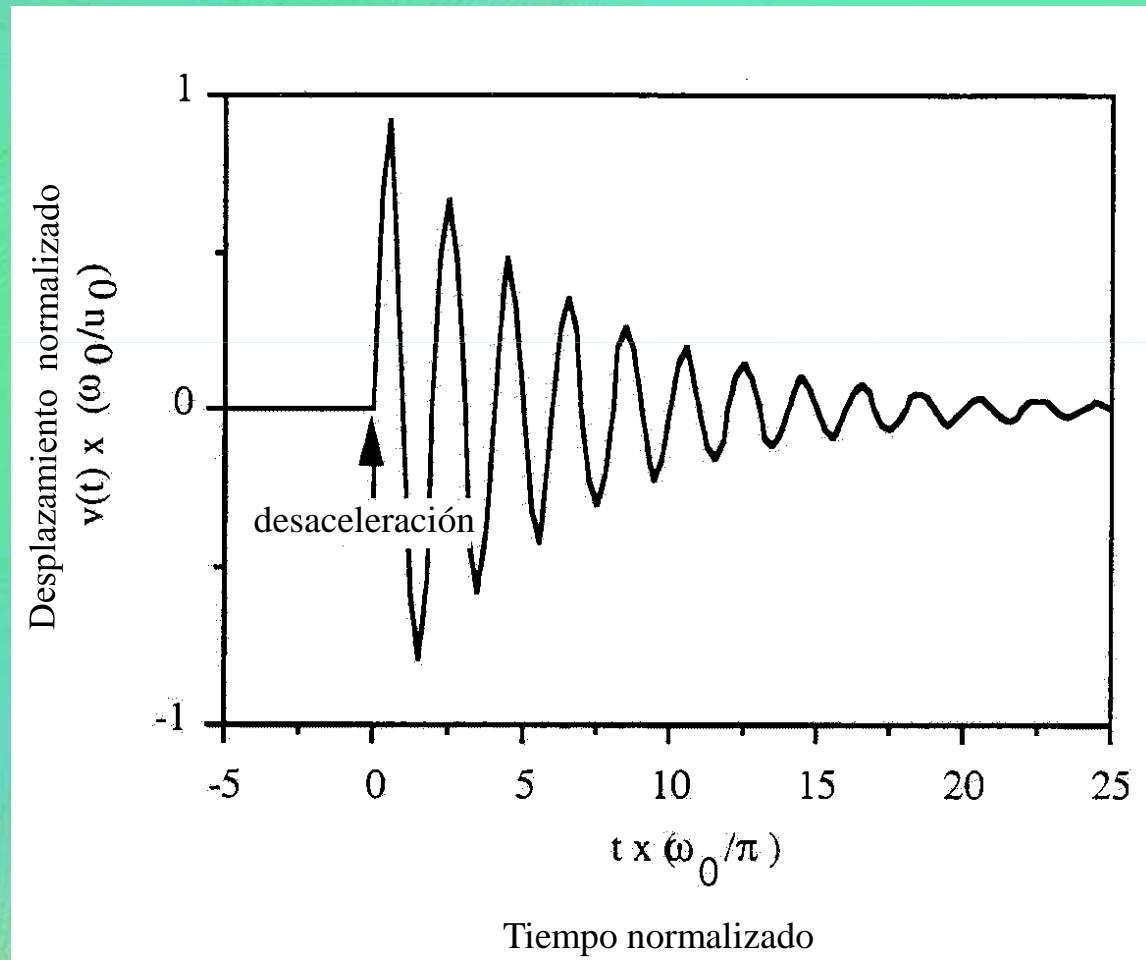


Dinámica de estructuras en vibración

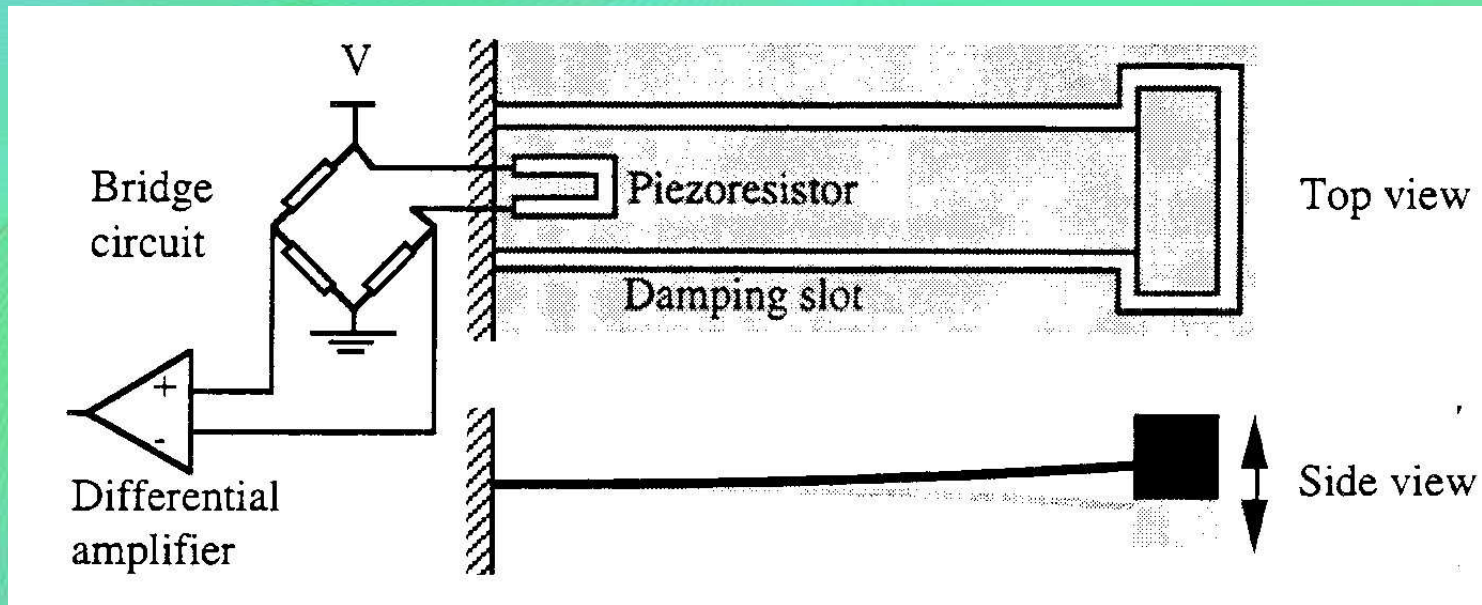


Acelerómetro

Dinámica de estructuras en vibración

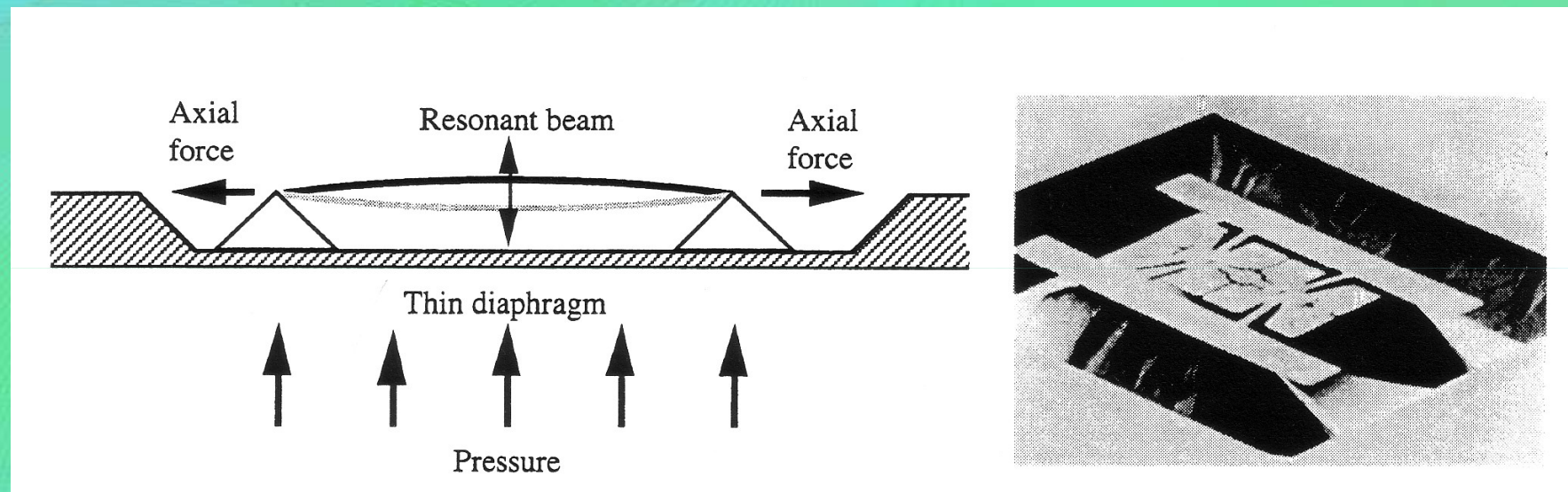


Dinámica de estructuras en vibración



Generación de una señal eléctrica a partir de un acelerómetro empleando piezoresistencias

Dinámica de estructuras en vibración



Sensor de presión empleando estructuras resonantes

Indice

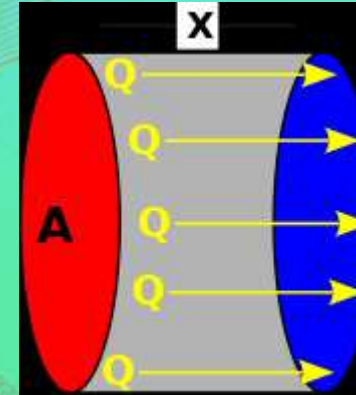
- Propiedades de los materiales
- Análisis de microestructuras
 - Modelado Mecánico.
 - Modelado Térmico.
 - Modelado Fluídico.
- Fuerzas en Microsistemas
 - Escalado de fuerzas
 - Valoración relativa

Modelado Térmico

- **Conducción.**

Ley de Fourier:

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$



$\frac{dQ_x}{dt}$ Tasa de flujo de calor que atraviesa el área A en la dirección x

k (o λ) **Conductividad Térmica.**
acero: 47 W/m·K cobre: 372 W/m·K Corcho: 0.03 W/m·K

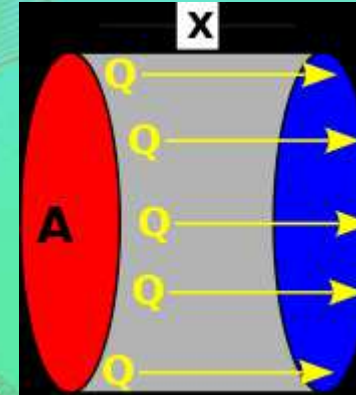
T temperatura.

t tiempo.

Modelado Térmico

- **Conducción.**

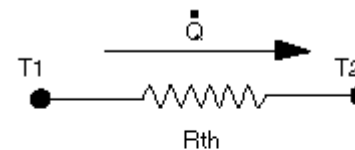
$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$



Si el comportamiento no depende de la dirección x:

$$\frac{dQ_x}{dt} = kA \frac{(T_{in} - T_{out})}{L} = \frac{(T_{in} - T_{out})}{\frac{L}{kA}} = \frac{(T_{in} - T_{out})}{R_{th}}$$

con $R_{th} = \frac{1}{k} \frac{L}{A}$. Esto nos lleva a una analogía eléctrica:



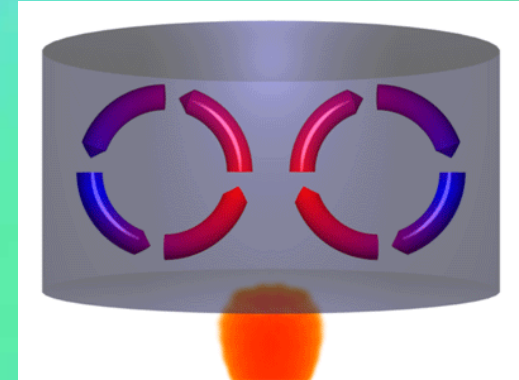
$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} ; T_1 > T_2$$

Modelado Térmico

- Convección.

Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ_x}{dt} = hA(T_s - T_\infty)$$



$$\frac{dQ_x}{dt}$$

Tasa de flujo de calor que atraviesa el área A

$$h$$

Coeficiente de Convección. Puede ser natural o forzada.

$$T_s$$

Temperatura de la superficie.

$$T_\infty$$

Temperatura líquido lejos de la superficie.

$$t$$

tiempo.

Modelado Térmico

- Radiación.

Ley del Stefan: Energía emitida por un cuerpo negro

$$e = \sigma T^4 \quad \text{con} \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Y la transferencia entre cuerpos negros:

$$q_{12} = e_{bb1} - e_{bb2} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

Indice

- Propiedades de los materiales
- Análisis de microestructuras
 - Modelado Mecánico.
 - Modelado Térmico.
 - Modelado Fluídico.
- Fuerzas en Microsistemas
 - Escalado de fuerzas
 - Valoración relativa

Modelado Fluídico

Modelos eléctricos equivalentes:

- Resistencia fluídica: Ley de Hagen-Poiseuille

$$P_{in} - P_{out} = R_f Q$$

con $R_f = \frac{128\mu L}{\pi D^4}$ para conducto circular.



- Pérdidas de Carga singulares. Ejemplo: cambio brusco sección

$$h = K \frac{v^2}{2}$$



Dout/Din	1,2	1,4	1,6	1,8	2
K	0,08	0,17	0,26	0,34	0,37

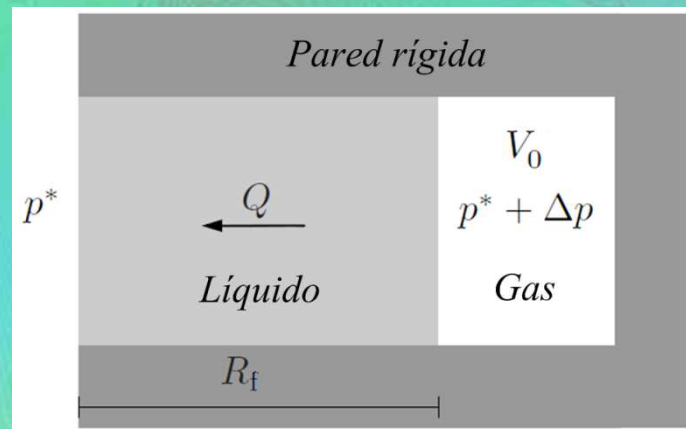
Modelado Fluídico

Modelos eléctricos equivalentes:

- Capacidad fluídica:

$$\Delta P = \frac{V}{C_f}$$

con $C_f = \frac{V_0}{P_0}$



Indice

- Propiedades de los materiales
- Análisis de microestructuras
 - Modelado Mecánico.
 - Modelado Térmico.
 - Modelado Fluídico.
- Fuerzas en Microsistemas
 - Escalado de fuerzas
 - Valoración relativa

Gravedad. Elásticas

Peso

$$p = mg = \rho L^3 g \Rightarrow L^3$$

Fuerzas Elásticas (ejemplo, una viga empotrada)

$$v = \frac{PL^3}{3EI} \Rightarrow F(v) = \frac{3EI}{L^3} v \Rightarrow k_{eq} = \frac{3EI}{L^3}$$

Para sección rectangular

$$I = \frac{bd^3}{12} \Rightarrow k_{eq} \approx E \frac{bd^3}{L^3} \Rightarrow L \Rightarrow F(v) = k_{eq} v \Rightarrow L^2$$

Indice

- Propiedades de los materiales
- Análisis de microestructuras
 - Estática plana
 - Viga empotrada y suspendida
 - Dinámica de estructuras en vibración
- Fuerzas en Microsistemas
 - Escalado de fuerzas
 - Valoración relativa

Propiedades

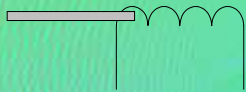
Escalado de fuerzas



Gravedad: L^3



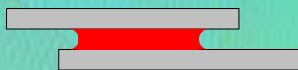
Elástica: L^2



Electromagnética: $L^2 - L^6$



Electroestáticas: $L^0 - L^2$



Fricción Viscosa: L^1



Tensión superficial: L^1