



Mecánica de Sólidos

04. Relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones

Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
Departamento de Ingeniería Civil

Michael Heredia Pérez
mherediap@unal.edu.co

Docente Ocasional
Ingeniero Civil
Esp. en Estructuras
Maestrando en Estructuras – Investigación

Derrotero

- 4.1. Materiales frágiles y materiales dúctiles
- 4.2. Comportamiento elástico y plástico de los materiales dúctiles
- 4.3. La ley de Hooke y los módulos de Young y Poisson
- 4.4. Relación entre las direcciones principales asociadas a los esfuerzos y a las deformaciones para materiales isótropos u ortótropos*
- 4.5. Cambios de volumen y dilatación cúbica*
- 4.6. Entendiendo el cambio de volumen de un sólido mediante el teorema de la divergencia*
- 4.7. Módulo de expansión volumétrica o módulo de compresibilidad*
- 4.8. Particularización de tres a dos dimensiones
- 4.9. Interpretación de los gráficos de colores de esfuerzos y deformaciones
- 4.10. Modificación de la ley de Hooke para tener en cuenta los efectos térmicos en el caso de materiales isótropos

Respositorio del curso: github.com/michaelherediaperez/mecanica_de_solidos_un

Advertencia

Estas presentaciones son solo una herramienta didáctica para guiar la clase, el estudiante no debe tomarlas como material de estudio y debe dirigirse a la literatura recomendada.



Anotaciones

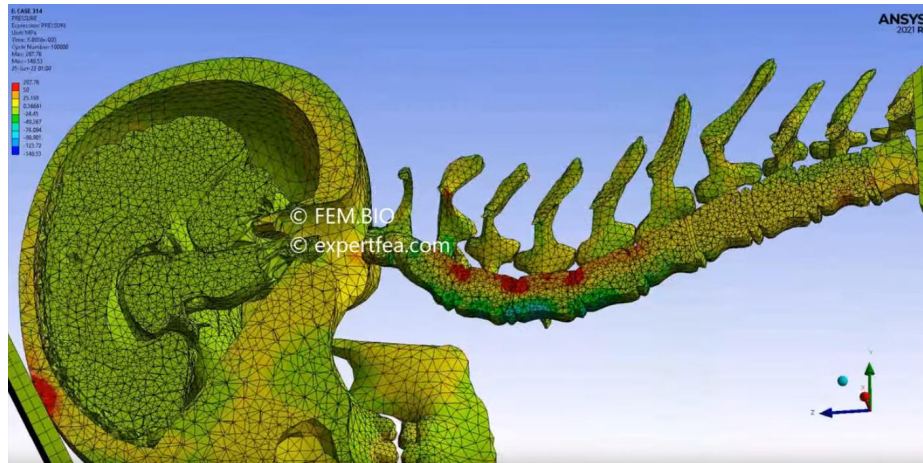
Las ecuaciones deducidas en los capítulos 2 y 3 solo tienen en cuenta factores geométricos y se ha aplicado equilibrio estático, por lo tanto son independientes del material.

La deformación de un sólido con esfuerzos aplicados depende de:

- velocidad de aplicación de estos
- historia de carga
- temperatura
- propiedades del material

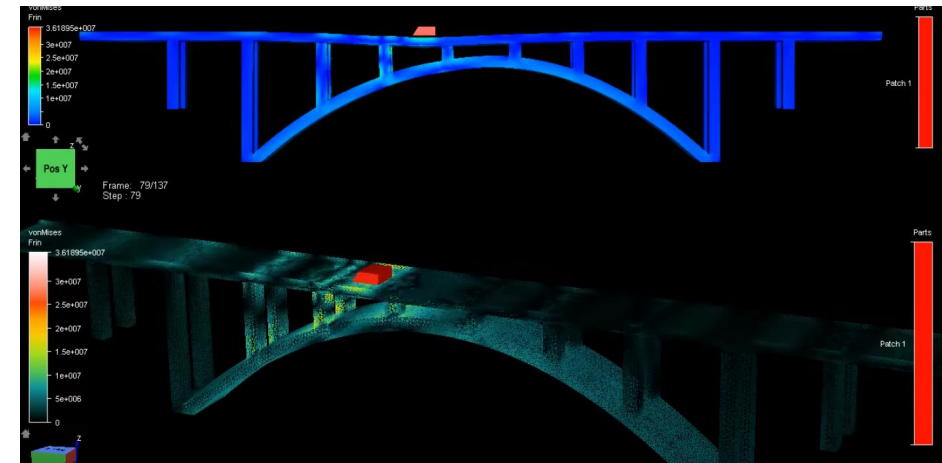
Modelos constitutivos

Modelos matemáticos que relacionan los esfuerzos y las deformaciones, teniendo en cuenta las variables anteriores (velocidad, historia de carga, temperatura y propiedades del material)



Simulation of Compression Shock of Skull with Brain Missing
Meninges - ANSYS Explicit Dynamics

<https://www.youtube.com/watch?v=IE-O3UCfwOs>



Linear Elasticity Problem using FEM (Bridge model)

<https://www.youtube.com/watch?v=IgfWjCvCSuk>

Modelos constitutivos

Analizaremos el modelo constitutivo de los llamados sólidos con comportamiento “*elástico lineal*”, **asumiendo que la velocidad de aplicación de la carga en el ensayo de carga-desplazamiento, no tiene ningún efecto en dicha relación elástica lineal.**

4.1. Materiales frágiles y materiales dúctiles

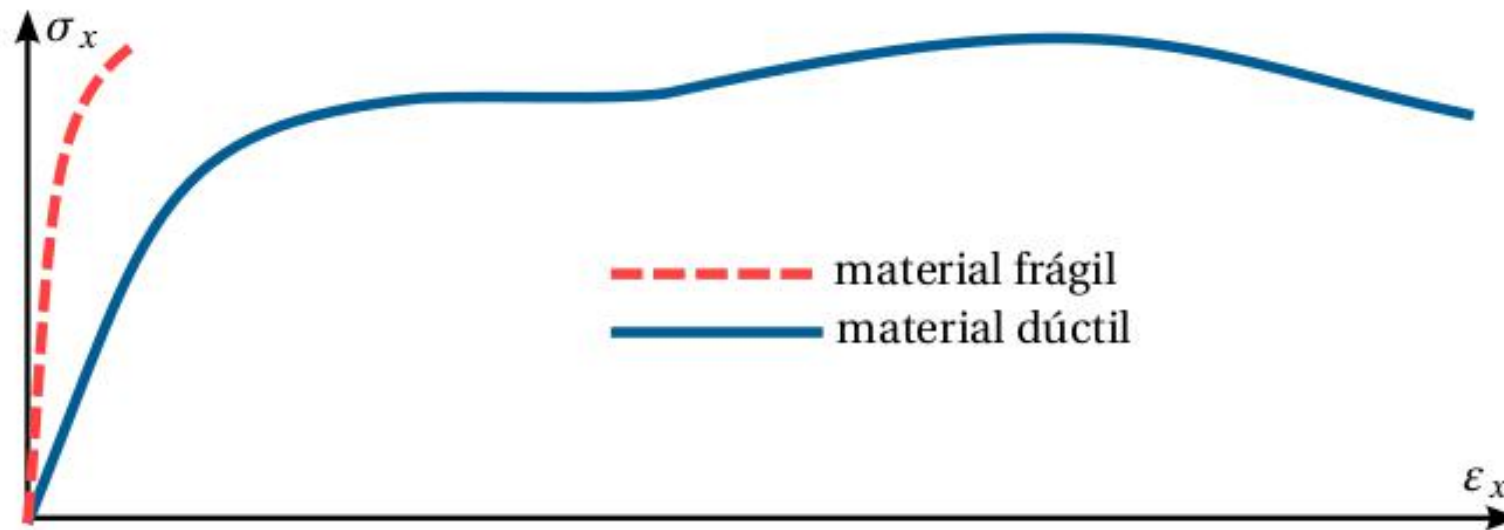


Figura 4.1: Curvas esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y frágiles. Mientras que un material dúctil presenta grandes deformaciones antes de romperse, un material frágil presenta pequeñas deformaciones antes de la falla.

Curvas esfuerzo-deformación

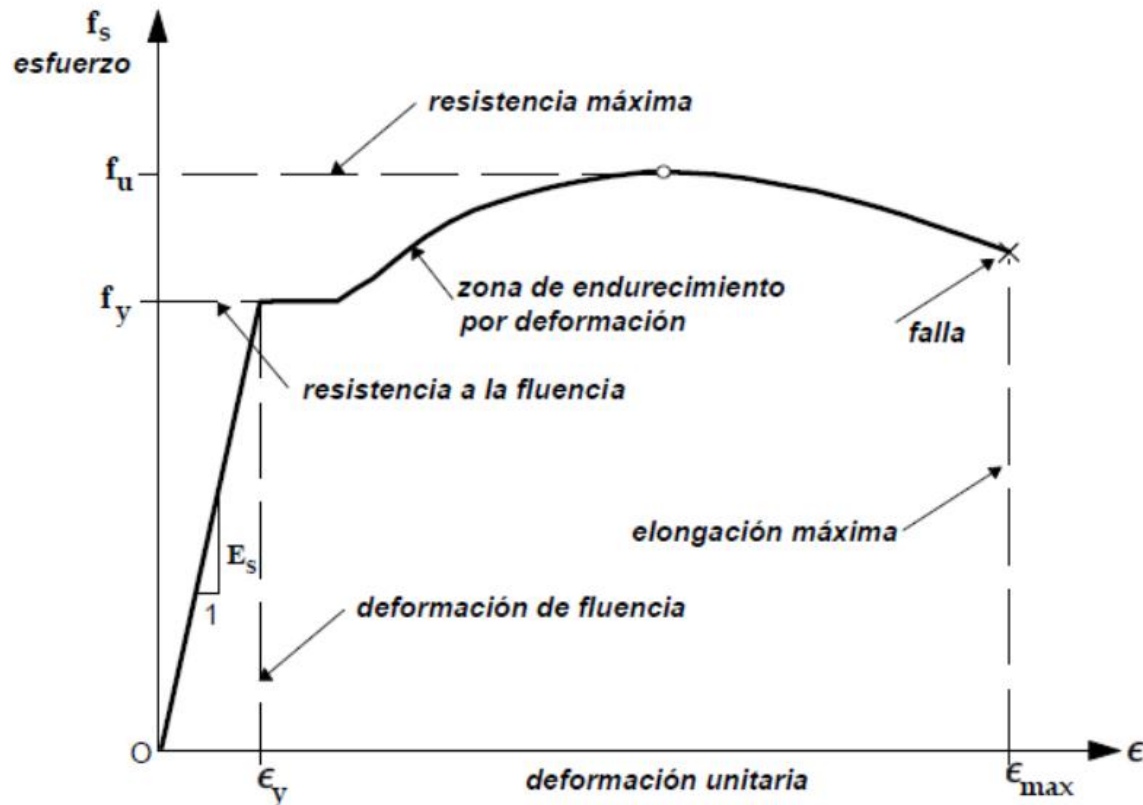


Figura 6-2(a) - Curva esfuerzo-deformación del acero de refuerzo

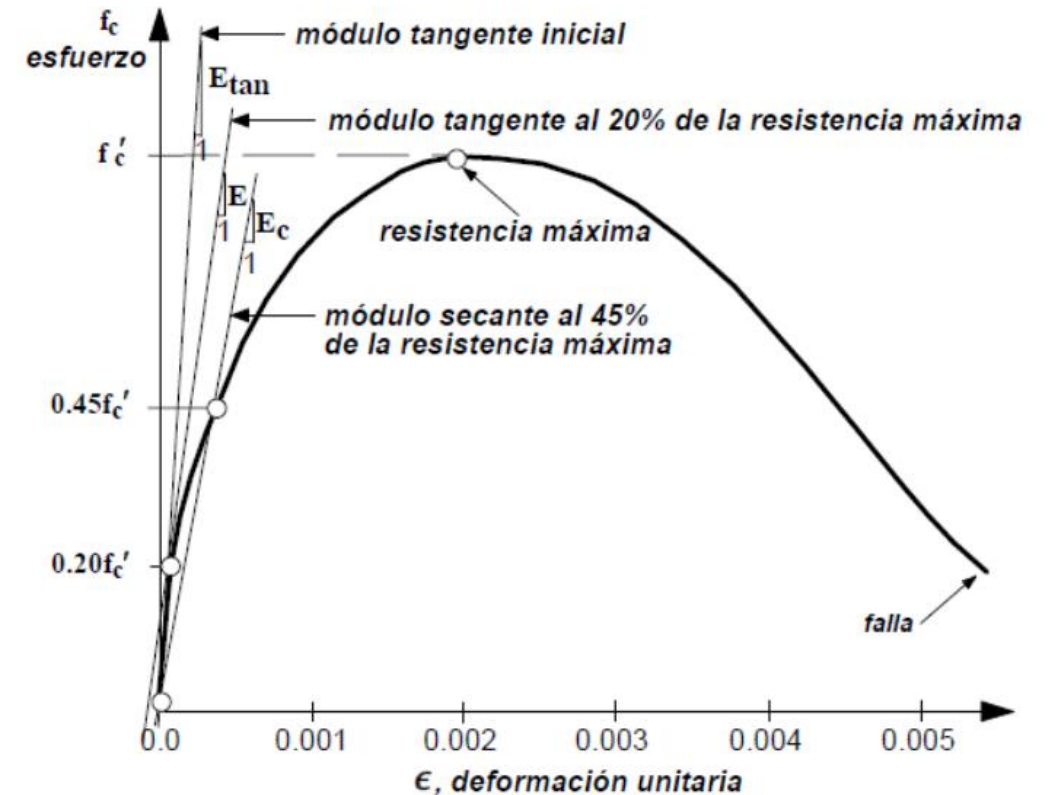
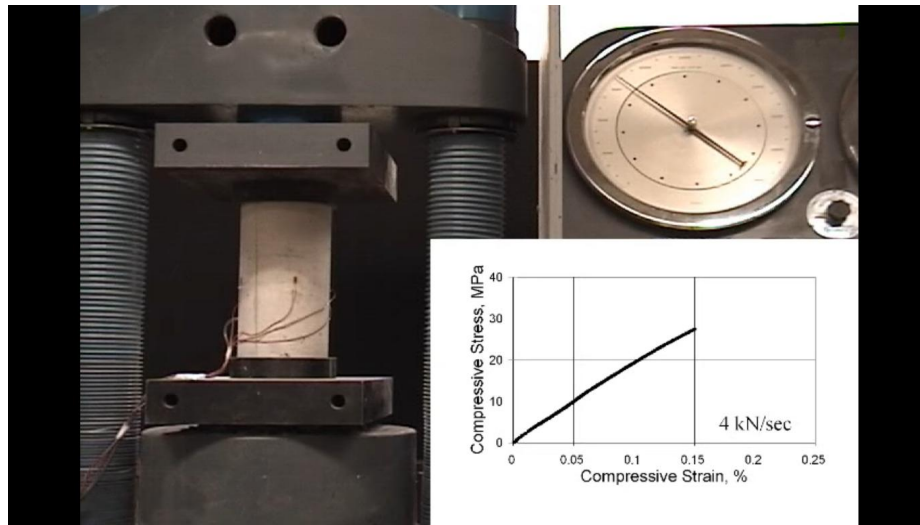


Figura 6-2(b) - Curva esfuerzo-deformación del concreto no confinado

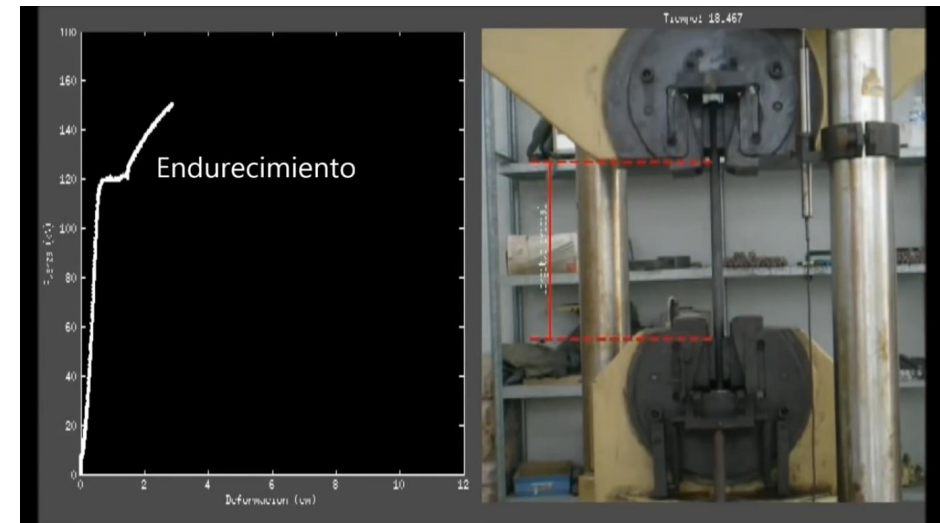
*No comparar escalas

García Reyes, 1998. *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*

Curvas esfuerzo-deformación



Compression testing of concrete
<https://www.youtube.com/watch?v=dtvm7YNsSU0>



Ensayo de tracción, resistencia de materiales
<https://www.youtube.com/watch?v=jKi2ID9zYik>

*No comparar escalas

García Reyes, 1998. *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*

4.2. Comportamiento elástico y plástico de los materiales dúctiles

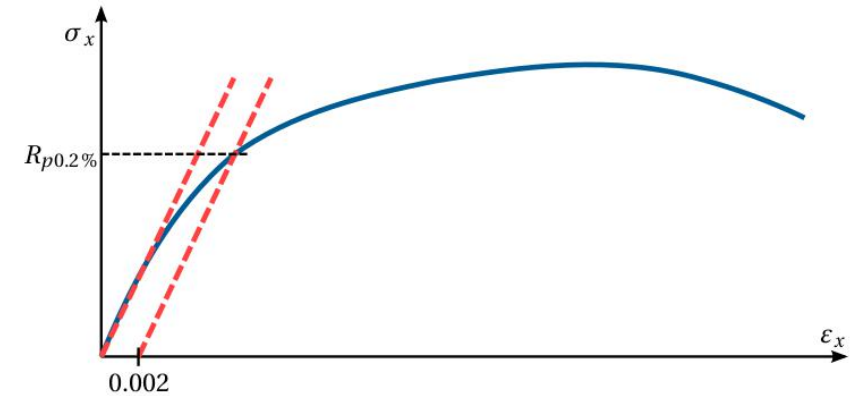
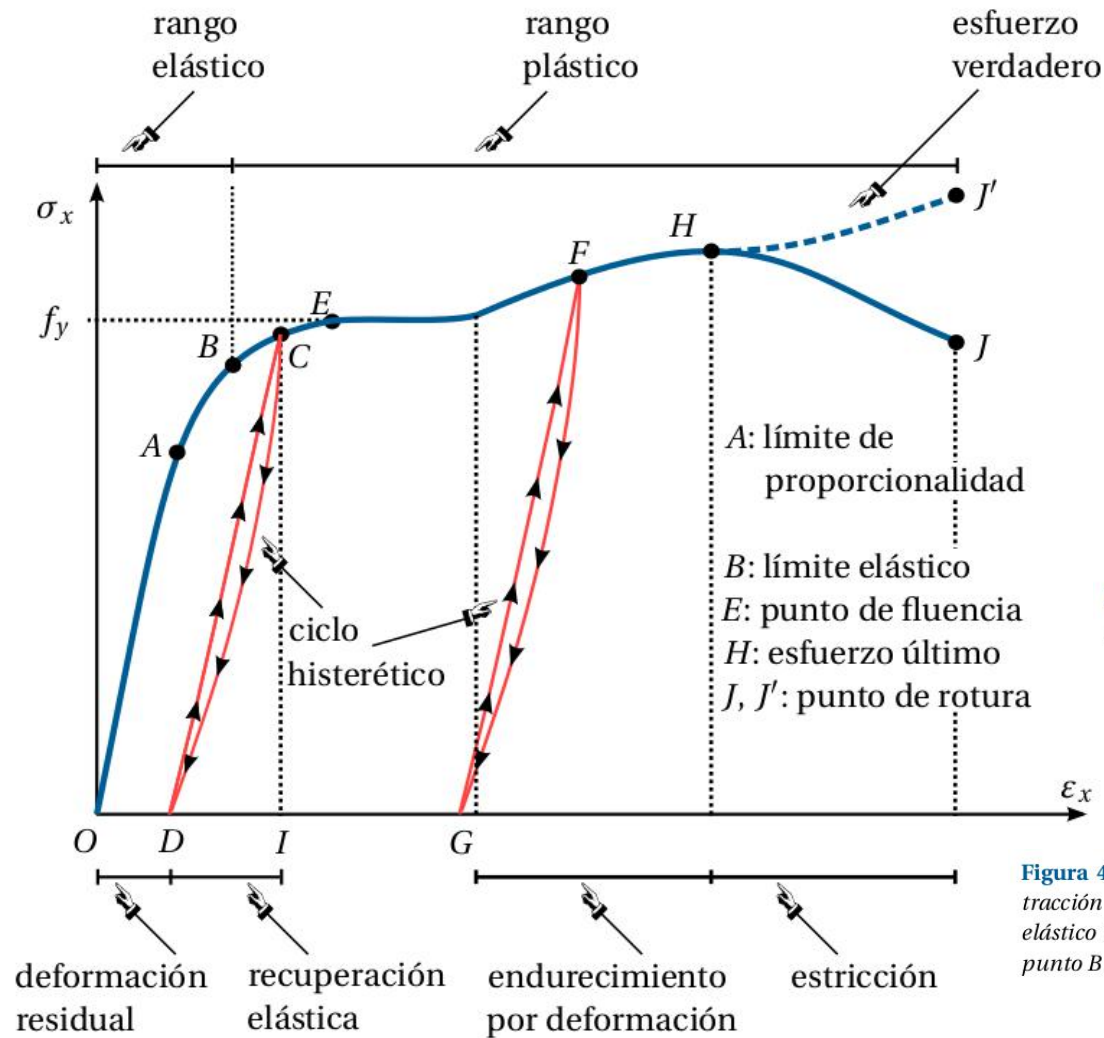
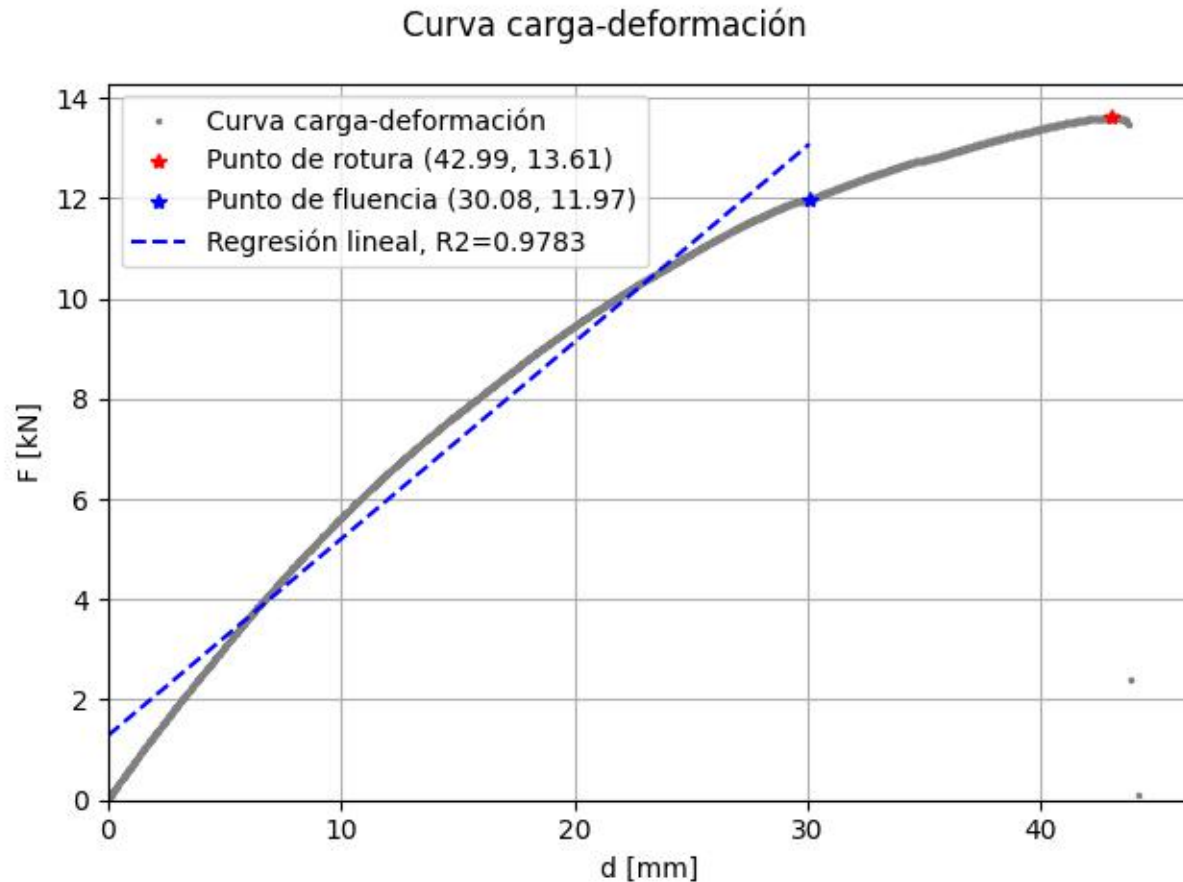


Figura 4.3: Determinación del esfuerzo de fluencia mediante el método de la compensación. Este método se emplea en materiales cuyo punto de fluencia no está claramente definido.

Figura 4.2: Ejemplo típico de la curva esfuerzo-deformación para un esfuerzo uniaxial de tracción en un material dúctil con comportamiento elasto-plástico: el comportamiento es elástico lineal para pequeñas deformaciones (tramo OA) y presenta plasticidad a partir del punto B .

4.2. Comportamiento elástico y plástico de los materiales dúctiles



Ensayo de madera plástica

Método de la compensación o
corregimiento ASTM A370

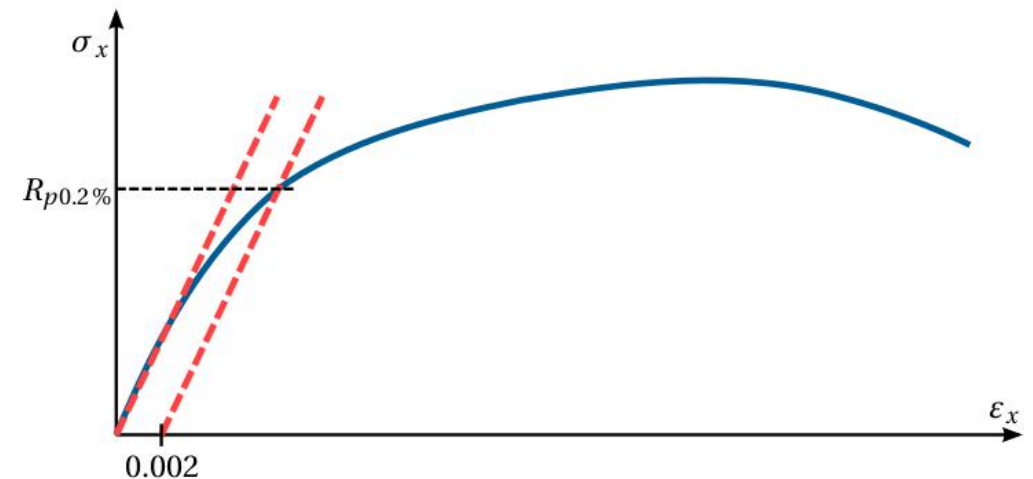
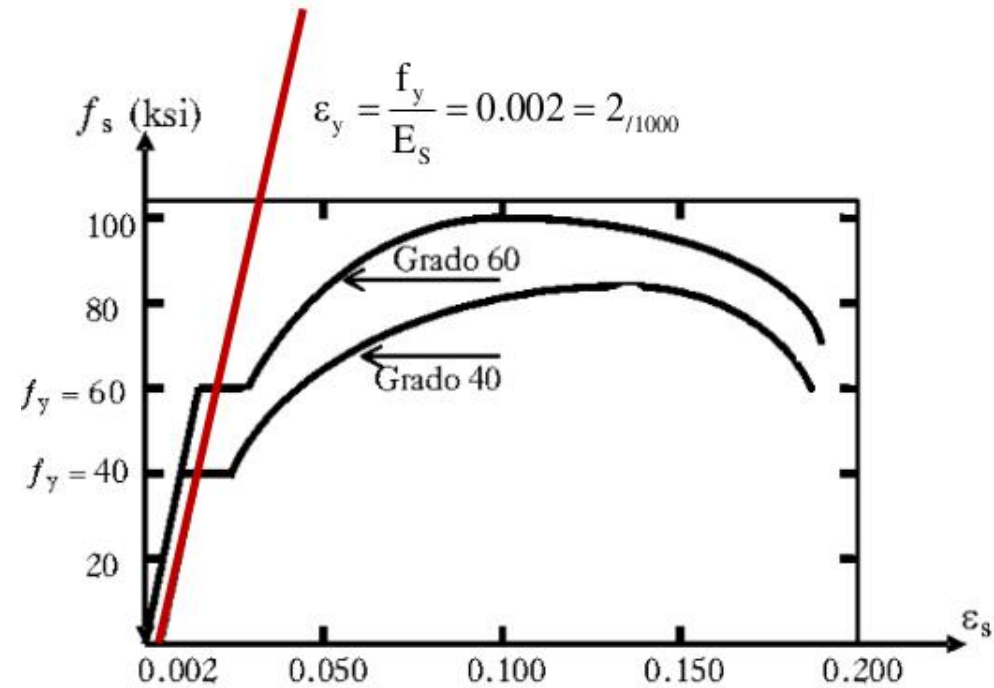
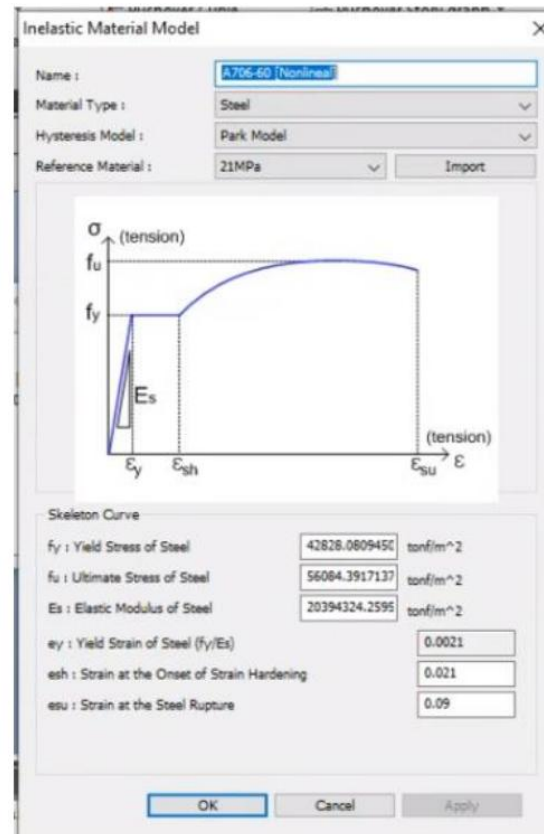
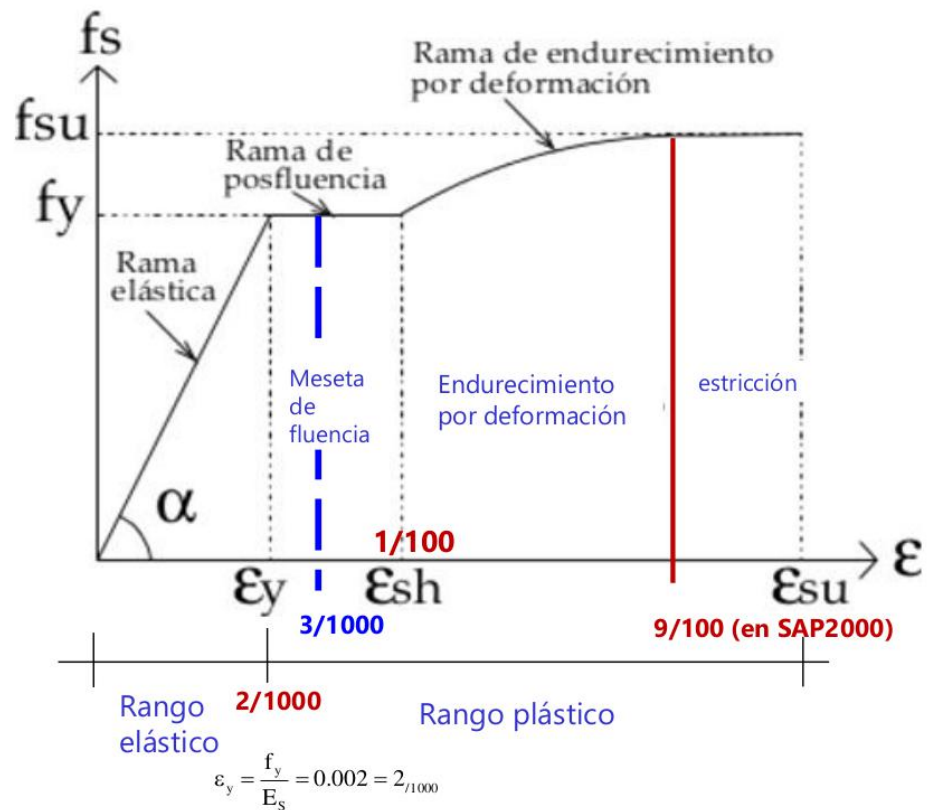


Figura 4.3: Determinación del esfuerzo de fluencia mediante el método de la compensación. Este método se emplea en materiales cuyo punto de fluencia no está claramente definido.

Comportamiento del acero



Módulo de elasticidad del acero estructural; [Rochel, 2007]

Curso de Diseño Sísmico de Concreto Reforzado; [Bedoya, 2022]

Comportamiento del concreto reforzado

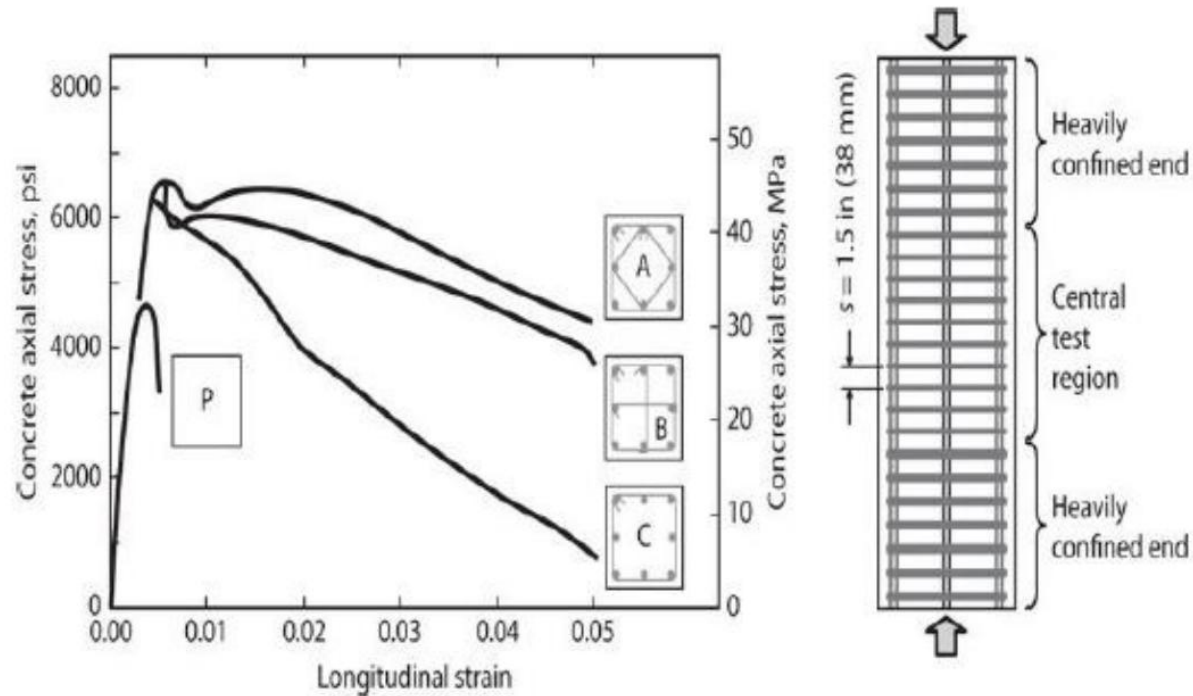


FIGURE 4.1 Stress–strain response of plain concrete (P) and three confined concrete cross sections. (After Moehle and Cavanagh, 1985, used with permission from ASCE.)

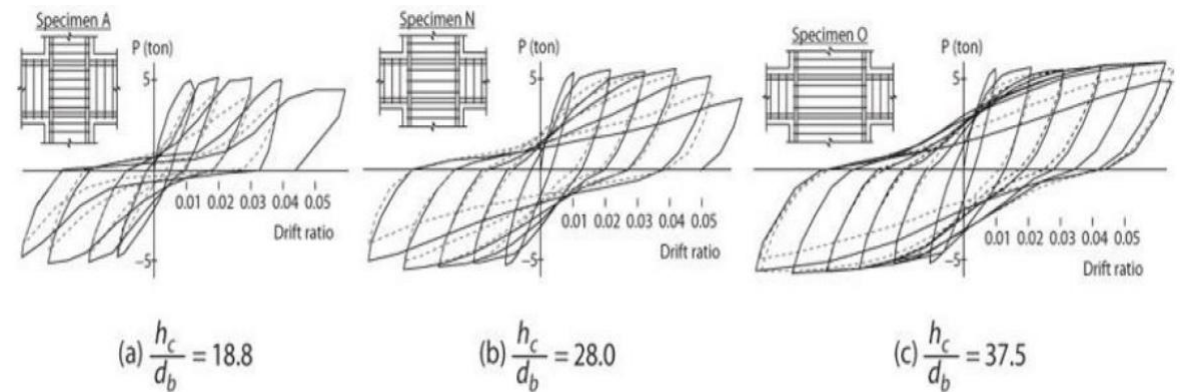
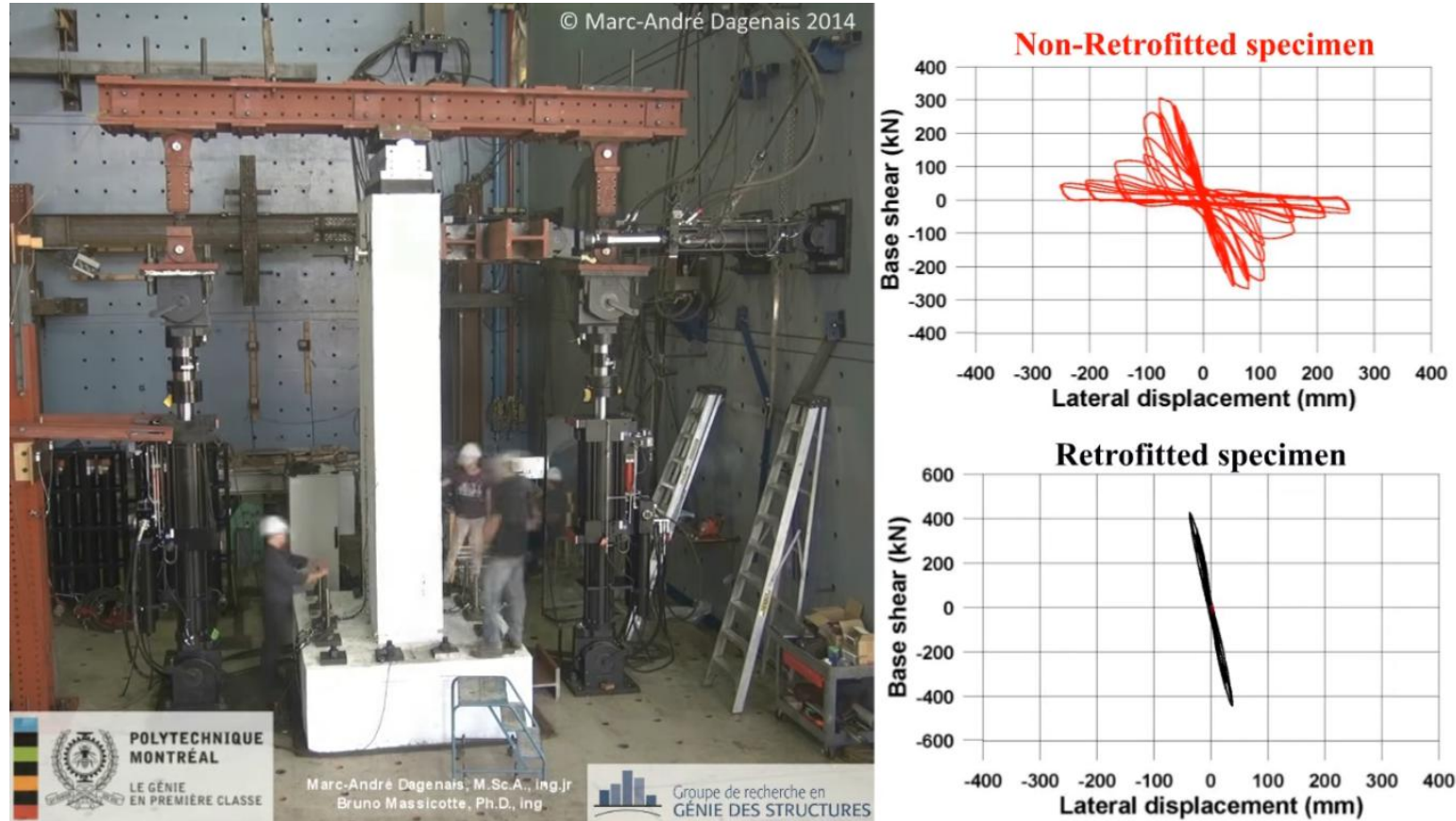


FIGURE 9.20 Column shear versus story displacement for interior beam–column joints with different values of h_c/d_b . (After Kaku and Asakusa, 1991, Courtesy of American Concrete Institute.)

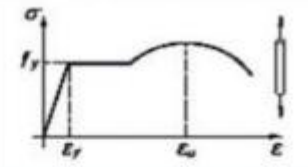
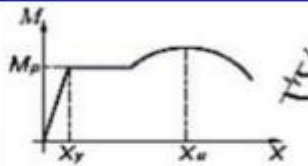
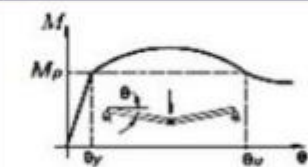
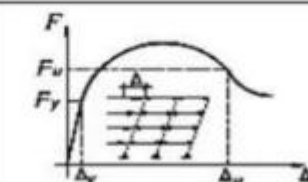
Ciclo de histéresis (*hysteresis loop*)

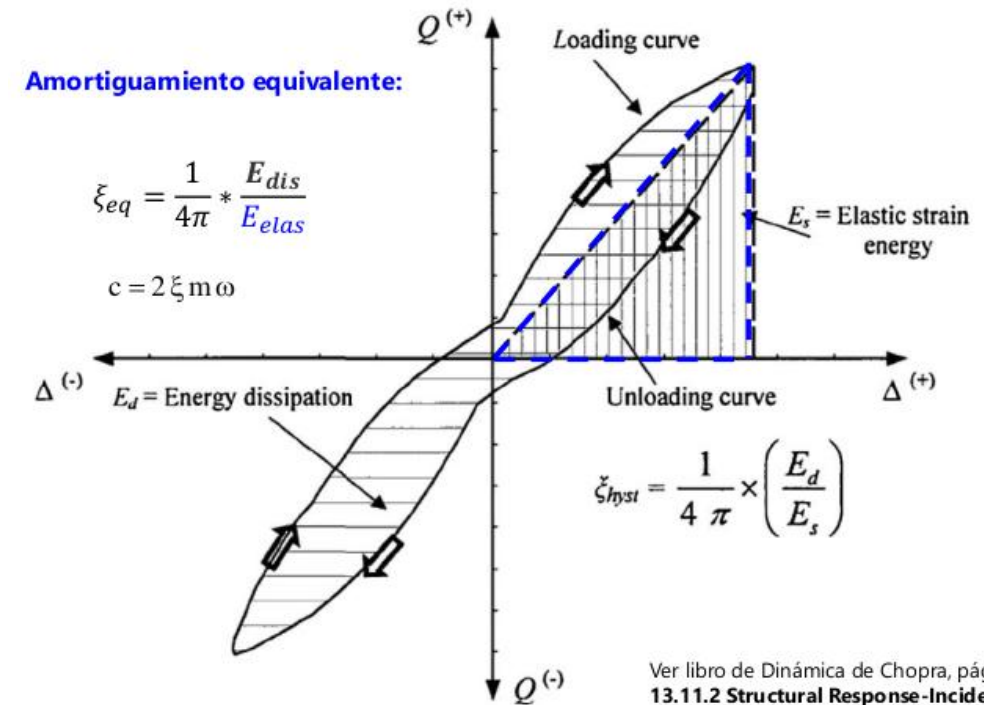


Hysteretic behaviour of non-retrofitted and retrofitted bridge piers reinforced by UHPFRC

<https://www.youtube.com/watch?v=gyu0WEDdWM0>

Ciclo de histéresis (*hysteresis loop*)

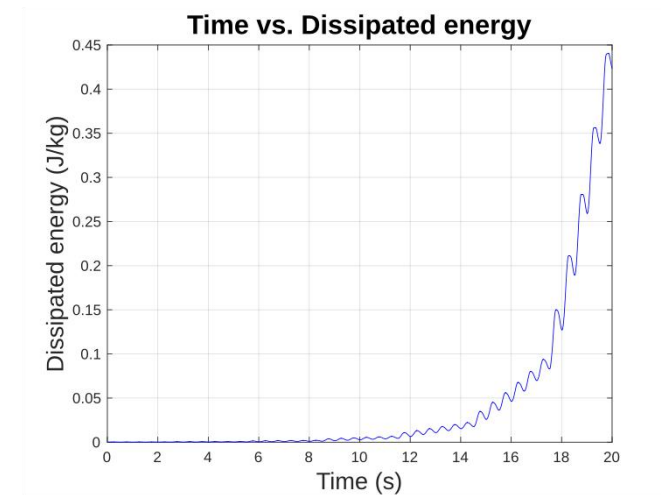
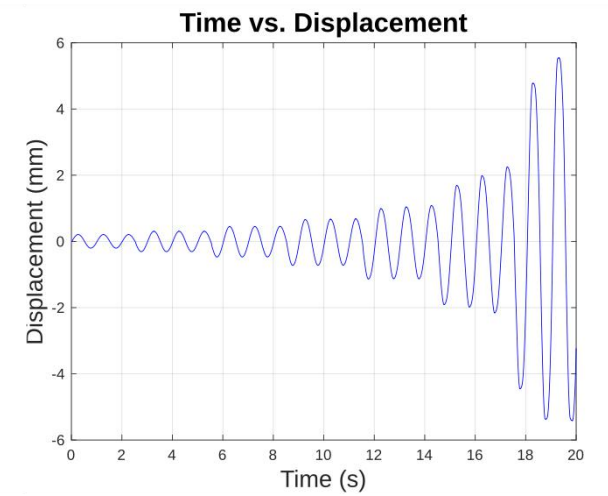
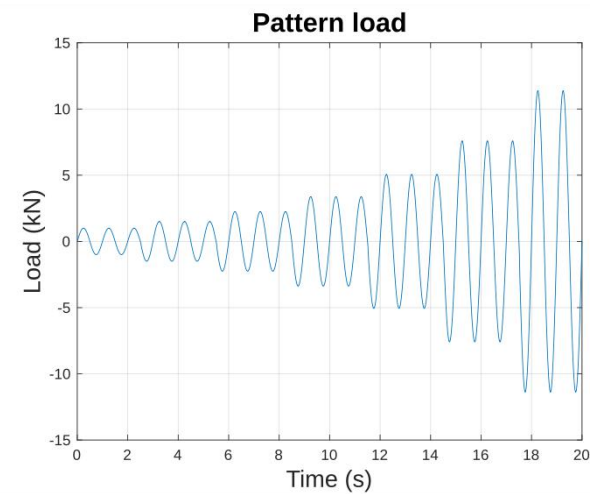
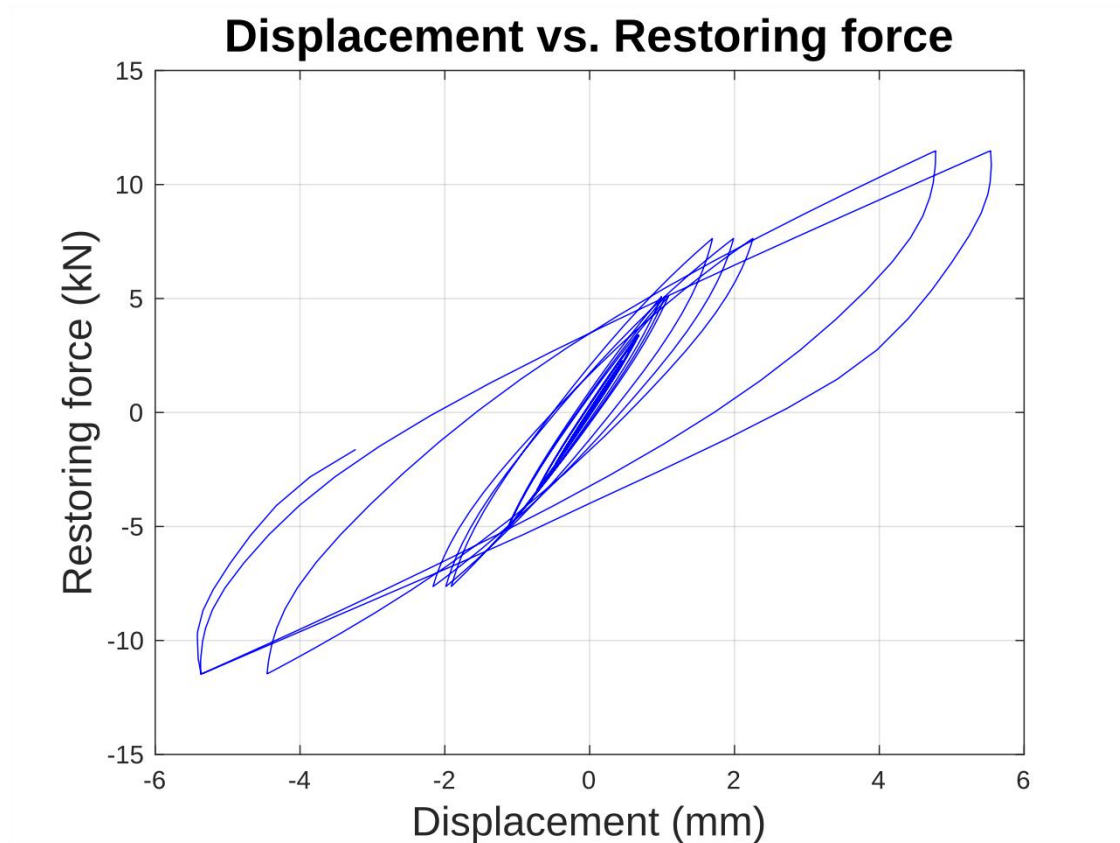
TIPO DE DUCTILIDAD	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA	DEFINICIÓN
DUCTILIDAD DEL MATERIAL (AXIAL)		$\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_f}$
DUCTILIDAD DE LA SECCIÓN (CURVATURA)		$\mu_x = \frac{x_u}{x_y}$
DUCTILIDAD DEL MIEMBRO (ROTACIÓN)		$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$
DUCTILIDAD DE LA ESTRUCTURA (DESPLAZAMIENTO)		$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$



Ver libro de Dinámica de Chopra, pág. 102.
13.11.2 Structural Response-Incident Angle Relation
 Pagina 599 leer para el análisis espectral tridimensional
 Ver **Cyclic Behavior**; Manual Analysis Reference Etabs
 pág. 108 pdf

Figura 7. Tipos de ductilidad, adaptado de ATC-40 [9], 19

Ciclo de histéresis (*hysteresis loop*)



4.3. La ley de Hooke y los módulos de Young y Poisson

- 4.3.1. Deformación de un sólido sometido a esfuerzos normales en las direcciones x , y y z
- 4.3.2. Deformación de un sólido sometido a esfuerzos tangenciales
- 4.3.3. Ley de Hooke generalizada para materiales isótropos
- 4.3.4. Ley de Hooke generalizada para materiales anisótropos
- 4.3.5. Ley de Hooke generalizada para materiales ortótropos

4.3. La ley de Hooke y los módulos de Young y Poisson

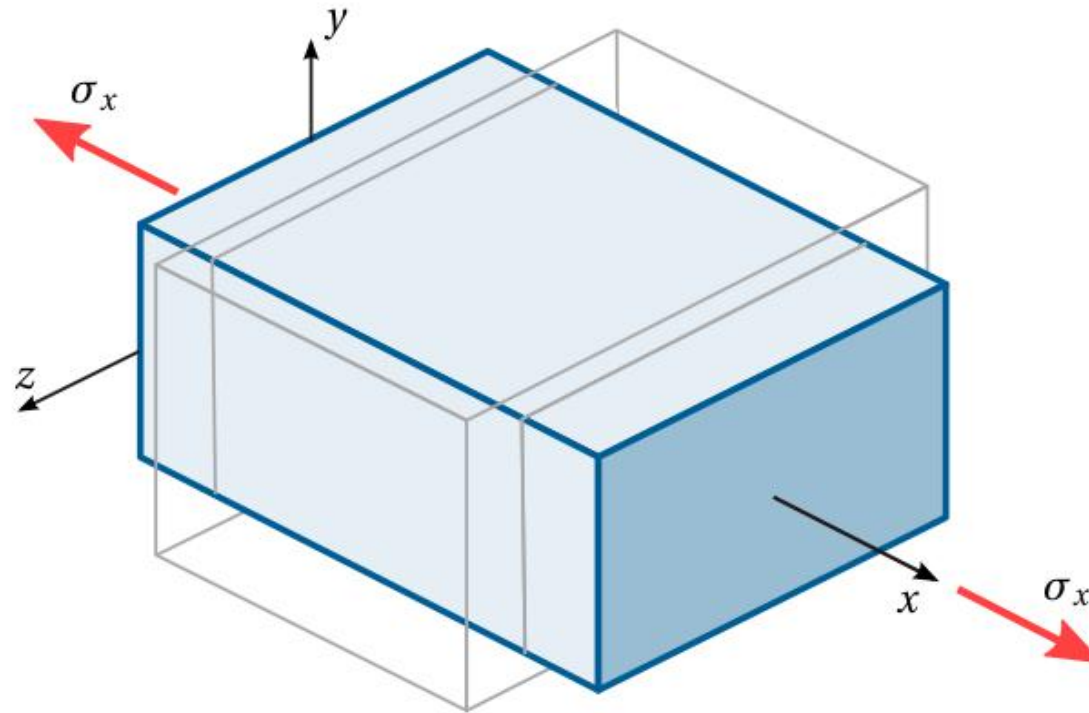


Figura 4.4: Forma deformada de un diferencial de sólido sometido a la contracción lateral que se produce por el efecto de Poisson: si sobre el cuerpo de la figura se aplica una fuerza de tracción en dirección x , se produce un alargamiento relativo (deformación longitudinal) ϵ_x en esa dirección y un acortamiento, encogimiento o contracción relativa ϵ_y y ϵ_z en las dos direcciones transversales.

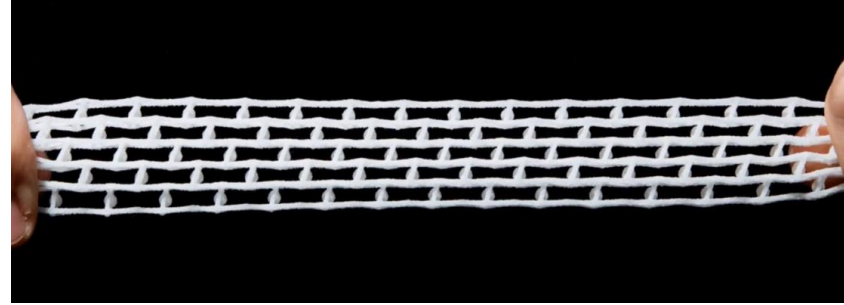
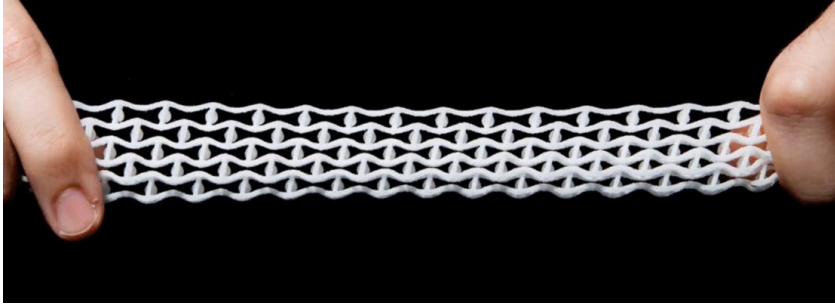
4.3. La ley de Hooke y los módulos de Young y Poisson

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \rightarrow \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \rightarrow \begin{matrix} \varepsilon_y = -\nu\varepsilon_x \rightarrow \varepsilon_y = -\nu\frac{\sigma_x}{E} \\ \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x \rightarrow \varepsilon_z = -\nu\frac{\sigma_x}{E} \end{matrix} \rightarrow \nu = -\frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

Tabla 4.1: Módulos de Young y coeficientes de Poisson para diferentes materiales.

Material	Módulo de Young (GPa) E	Coefficiente de Poisson ν
Acero	200	0.27 – 0.30
Arcilla saturada	4 – 20	0.40 – 0.499
Caucho	0.01 – 0.1	≈ 0.499
Concreto	21.5 – 39	0.20
Corcho	0.032	≈ 0
Material augético		negativo
Nanotubos de carbono	1000 – 5000	-0.2 – 0.06

Materiales auxéticos



Auxetic MetaMaterials: <https://www.youtube.com/watch?v=mKKC4dejJnU>



Material Conexion Bilbao, espuma auxética: <https://www.facebook.com/watch/?v=708393856186455>

4.3.1. Deformaciones de un sólido sometido a esfuerzos normales en las direcciones x , y y z

Tabla 4.2: Deformaciones longitudinales producidas por los diferentes esfuerzos. Dichas deformaciones longitudinales se suman en cada dirección (esto es, en cada fila) por virtud del principio de superposición, tal y como se indica en la Figura 4.5, para producir la deformación elástica total.

deformación longitudinal	producida por σ_x	producida por σ_y	producida por σ_z	producida conjuntamente por σ_x , σ_y y σ_z
ε_x	$\frac{\sigma_x}{E}$	$-\nu \frac{\sigma_y}{E}$	$-\nu \frac{\sigma_z}{E}$	$\frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z))$
ε_y	$-\nu \frac{\sigma_x}{E}$	$\frac{\sigma_y}{E}$	$-\nu \frac{\sigma_z}{E}$	$\frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z))$
ε_z	$-\nu \frac{\sigma_x}{E}$	$-\nu \frac{\sigma_y}{E}$	$\frac{\sigma_z}{E}$	$\frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y))$

4.3.1. Deformaciones de un sólido sometido a esfuerzos normales en las direcciones x , y y z

Principio de superposición: dice que para un sistema lineal, la respuesta neta, para una posición y tiempo dados, causada por dos o más estímulos, es la suma de las respuestas que causan cada uno de los estímulos individualmente.

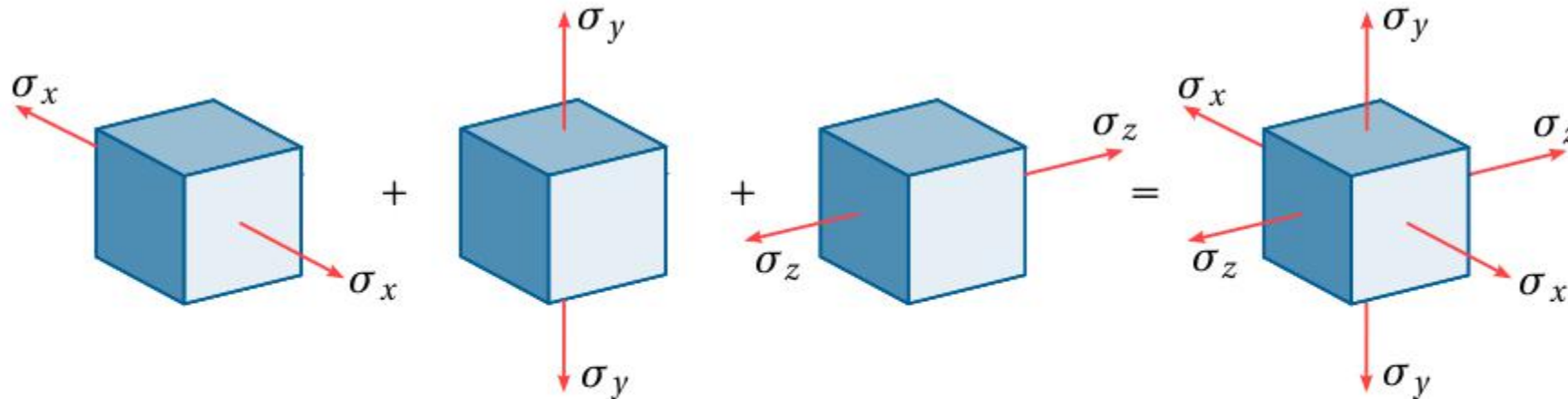


Figura 4.5: Al utilizar el principio de superposición, se asume implícitamente que la acción conjunta de los esfuerzos en un sólido tridimensional se puede analizar como la suma de los efectos producidos individualmente por cada uno de los esfuerzos aplicados en las direcciones x , y y z sobre el sólido en consideración.

4.3.1. Deformaciones de un sólido sometido a esfuerzos normales en las direcciones x , y y z

Legitimidad del principio de superposición

- Deformaciones y desplazamientos pequeños.
- Los desplazamientos no afectan sustancialmente la acción de las fuerzas externas.

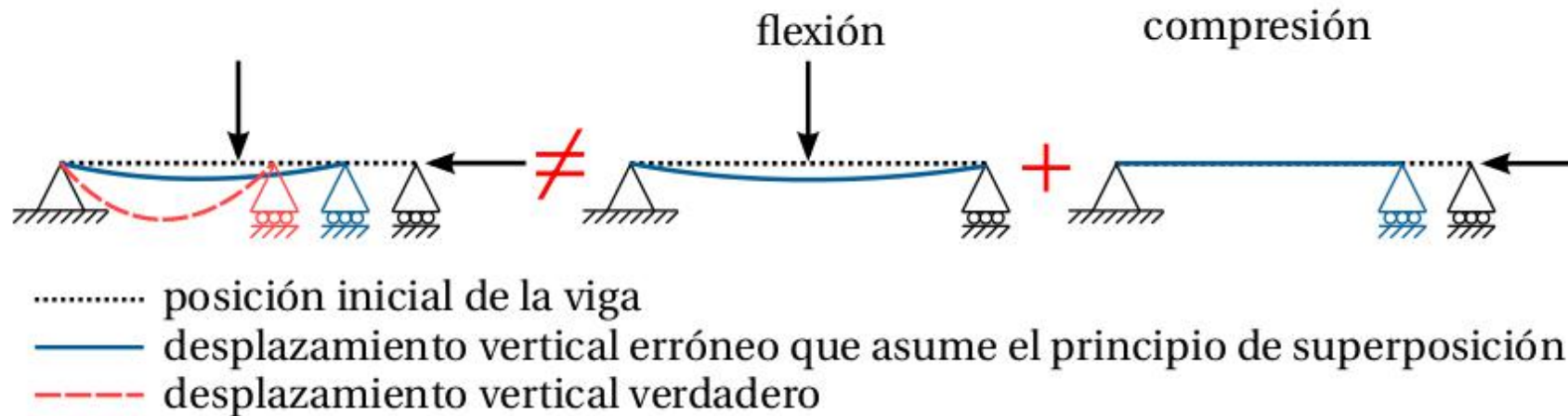


Figura 4.6: Barra esbelta sometida a flexo-compresión. El principio de superposición asumiría erróneamente que la barra no se pandea, por lo que estimaría unos desplazamientos verticales inferiores a los verdaderos. En realidad la carga vertical incrementa aún más el pandeo de la barra inducida por la carga axial. Por esta razón, no es posible utilizar el principio de superposición en elementos esbeltos sometidos a flexo-compresión.

4.3.2. Deformación de un sólido sometido a esfuerzos tangenciales

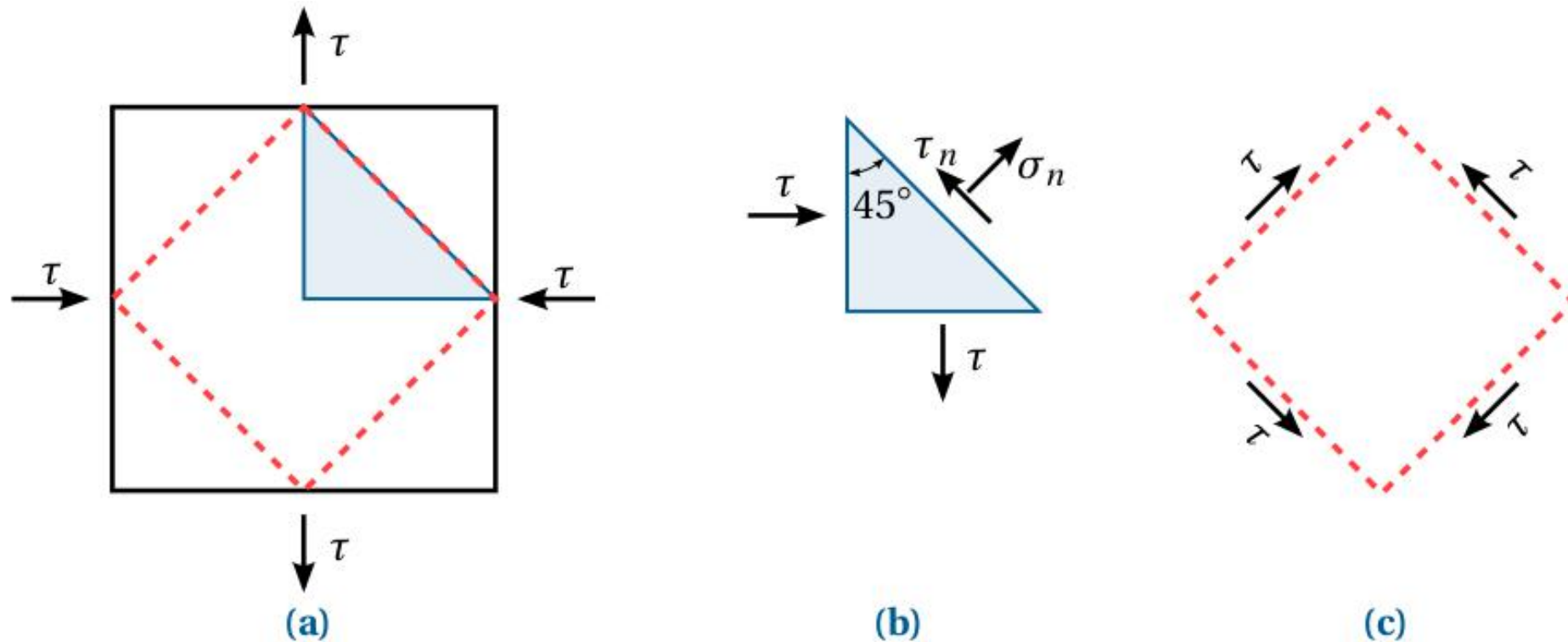


Figura 4.7: Esfuerzos aplicados sobre el cuadrado considerado en la Sección 4.3.2. El cuadrado negro mostrado en la Figura (a) tiene un lado de longitud L .

4.3.2. Deformación de un sólido sometido a esfuerzos tangenciales

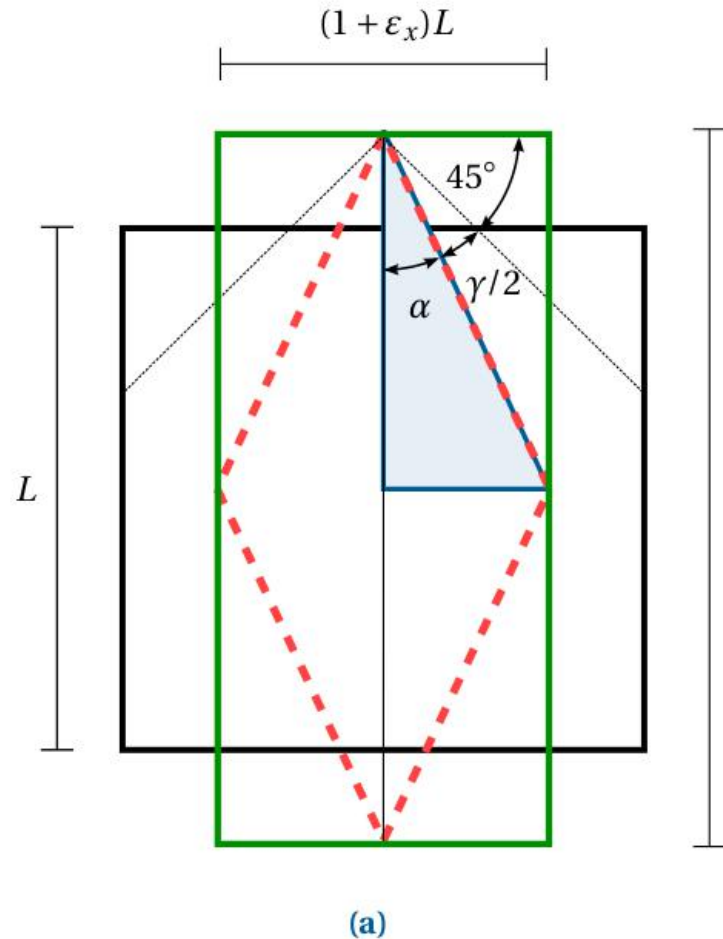
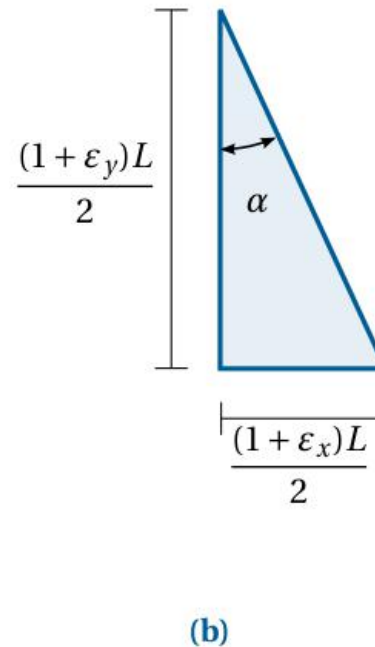


Figura 4.8: Cambios de forma del cuadrado negro considerado en la Sección 4.3.2. Recuerde que si la longitud inicial de una barra es L y esta se somete a una carga que le imprime una deformación longitudinal ϵ , el estiramiento ΔL de la barra será ϵL y su longitud final será $L + \epsilon L = (1 + \epsilon)L$; esta analogía se puede utilizar para verificar las dimensiones del sólido deformado.



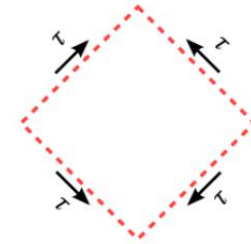
https://github.com/michaelherediapez/mecanica_de_solidos_un/blob/main/codigos/cap_04/04_03_02.ipynb

$$G := \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

4.3.2. Deformación de un sólido sometido a esfuerzos tangenciales

Un elemento sólido que esté hecho de un material **elástico** e **isótropo**:

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}.$$



Para un material con comportamiento lineal, elástico, e isótropo, las deformaciones longitudinales no están afectadas por las deformaciones angulares y no existe un efecto de Poisson para el esfuerzo cortante.

4.3.2. Deformación de un sólido sometido a esfuerzos tangenciales

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}.$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \end{aligned}$$

en notación tensorial

$$\longrightarrow \varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu \delta_{ij} \sigma_{kk}]$$

$$\begin{aligned} \text{Ejemplo, } \varepsilon_y &\longrightarrow \varepsilon_y = \varepsilon_{22} = \frac{1}{E} \left[(1 + \nu) \sigma_{22} - \nu \delta_{22} \sum_{k=1}^3 \sigma_{kk} \right] \\ &= \frac{1}{E} [(1 + \nu) \sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)] \\ &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)]. \end{aligned}$$

4.3.3. Ley de Hooke generalizada para materiales isótropos

Isótropo: propiedades mecánicas iguales en todas las direcciones del análisis

Deformaciones longitudinales y angulares son independientes

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}.$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \end{aligned}$$

Despejando los esfuerzos

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2G \varepsilon_{ij}$$

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda e + 2G \varepsilon_x \\ \sigma_y &= \lambda e + 2G \varepsilon_y \\ \sigma_z &= \lambda e + 2G \varepsilon_z \\ \tau_{xy} &= G \gamma_{xy} \\ \tau_{xz} &= G \gamma_{xz} \\ \tau_{yz} &= G \gamma_{yz}. \end{aligned}$$

$$\lambda := \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}.$$

Constante de Lamé

Ecuaciones de Lamé

4.3.3. Ley de Hooke generalizada para materiales isótropos

https://github.com/michaelherediaperez/mecanica_de_solidos_un/blob/main/codigos/cap_04/04_03_03.ipynb

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{pmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

D: matriz constitutiva o matriz de constantes elásticas, para un material isótropico

$$\underline{\underline{\sigma}} = \lambda \operatorname{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}) \mathbf{I} + 2G \underline{\underline{\varepsilon}}$$

Relación entre la matriz de tensiones y la de deformaciones matemáticas

4.3.4. Ley de Hooke generalizada para materiales anisótropos

Anisótropo: propiedades mecánicas diferentes según la dirección del análisis

Material anisótropo, lineal y elástico

$$\sigma_x = d_{1111}\epsilon_x + d_{1122}\epsilon_y + d_{1133}\epsilon_z + d_{1123}\gamma_{yz} + d_{1113}\gamma_{xz} + d_{1112}\gamma_{xy}$$

$$= d_{1111}\epsilon_x + d_{1122}\epsilon_y + d_{1133}\epsilon_z + 2d_{1123}\epsilon_{yz} + 2d_{1113}\epsilon_{xz} + 2d_{1112}\epsilon_{xy},$$

combinación lineal de las 6 componentes de deformación

d_{ijkl} independiente de (x, y, z) cuando el material es homogéneo

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{xy} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{pmatrix}$$

Notación de Voigt

$$\sigma_{ij} = d_{ijkl}\epsilon_{kl}$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{\sigma}} = \underbrace{\begin{pmatrix} d_{1111} & d_{1122} & d_{1133} & d_{1123} & d_{1113} & d_{1112} \\ d_{2211} & d_{2222} & d_{2233} & d_{2223} & d_{2213} & d_{2212} \\ d_{3311} & d_{3322} & d_{3333} & d_{3323} & d_{3313} & d_{3312} \\ d_{2311} & d_{2322} & d_{2333} & d_{2323} & d_{2313} & d_{2312} \\ d_{1311} & d_{1322} & d_{1333} & d_{1323} & d_{1313} & d_{1312} \\ d_{1211} & d_{1222} & d_{1233} & d_{1223} & d_{1213} & d_{1212} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{D}} \underbrace{\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{\epsilon}}$$

4.3.4. Ley de Hooke generalizada para materiales anisótropos

Aquí el orden de los elementos del esfuerzo cortante y de la deformación angular es el que comúnmente se asume en mecánica de sólidos. Su elección no es arbitraria, sino que está dada bajo el criterio de que $x = 1$, $y = 2$ y $z = 3$ y que $\sigma_{ij} = \sigma_k$ para $i, j, k = 1, 2, \dots, 6$ de tal modo que $i + j + k = 9$. Por ejemplo, si $i = 2$ y $j = 3$, entonces $k = 4$. Esto explica el porqué de la relación $\tau_{yz} = \sigma_{23} = \sigma_4$.

$$\underbrace{\begin{aligned}
 \boldsymbol{\sigma} &= \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} & \boldsymbol{\epsilon} &= \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{xy} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{pmatrix}
 \end{aligned}}_{\text{Notación de Voigt}} \longrightarrow \boxed{\begin{aligned}
 \underbrace{\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{\sigma}} &= \underbrace{\begin{pmatrix} d_{1111} & d_{1122} & d_{1133} & d_{1123} & d_{1113} & d_{1112} \\ d_{2211} & d_{2222} & d_{2233} & d_{2223} & d_{2213} & d_{2212} \\ d_{3311} & d_{3322} & d_{3333} & d_{3323} & d_{3313} & d_{3312} \\ d_{2311} & d_{2322} & d_{2333} & d_{2323} & d_{2313} & d_{2312} \\ d_{1311} & d_{1322} & d_{1333} & d_{1323} & d_{1313} & d_{1312} \\ d_{1211} & d_{1222} & d_{1233} & d_{1223} & d_{1213} & d_{1212} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{D}} \underbrace{\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{\epsilon}}
 \end{aligned}}$$

Notación de Voigt

A.5. Notación tensorial de Voigt

Woldemar Voigt

Ejemplo:

La matriz de esfuerzos de Cauchy:

$$\underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Se puede expresar como un vector de dimensión 6:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \equiv [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6]^T$$

4.3.4. Ley de Hooke generalizada para materiales anisótropos

$$\sigma_{ij} = \underbrace{d_{ijkl}}_{\text{tensor de orden 4}} \varepsilon_{kl}$$

d_{ijkl} es un tensor de orden 4 ($3^4=81$) con propiedades de simetría

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{ijkl} = d_{jikl} , \sigma_{ij} = \sigma_{ji} \\ d_{ijkl} = d_{ijlk} , \varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk} \end{array} \right.$$

Tenga en cuenta que aunque un material puede ser anisótropo en una escala de medida, se puede considerar isótropo en otra escala, en general, mayor. Ejemplo: el concreto

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}}_{\sigma} = \underbrace{\begin{pmatrix} d_{1111} & d_{1122} & d_{1133} & d_{1123} & d_{1113} & d_{1112} \\ d_{2211} & d_{2222} & d_{2233} & d_{2223} & d_{2213} & d_{2212} \\ d_{3311} & d_{3322} & d_{3333} & d_{3323} & d_{3313} & d_{3312} \\ d_{2311} & d_{2322} & d_{2333} & d_{2323} & d_{2313} & d_{2312} \\ d_{1311} & d_{1322} & d_{1333} & d_{1323} & d_{1313} & d_{1312} \\ d_{1211} & d_{1222} & d_{1233} & d_{1223} & d_{1213} & d_{1212} \end{pmatrix}}_D \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix}}_{\varepsilon}$$

D es una matriz ($6^2=36$) definida positiva y simétrica: $d_{ijkl} = d_{klij}$
(Solecki y Connant, 2003)

$D^{-1} = S$ es la matriz de conformidad
 $\varepsilon = S\sigma$

D : matriz constitutiva o matriz de constantes elásticas, para un material anisotrópico (caso más general)

Repaso: Matriz definida positiva

Se dice que una matriz \mathbf{K} es definida positiva si: $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times n}$

$$\mathbf{x}^T \mathbf{K} \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i K_{ij} x_j > 0$$

Para todo $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$

Alternativamente, una matriz es definida positiva si todos sus valores propios son números reales positivos. Toda matriz definida positiva \mathbf{K} es invertible, su inversa \mathbf{K}^{-1} existe.

4.3.5. Ley de Hooke generalizada para materiales ortótropos

ortótropo: propiedades mecánicas diferentes en tres direcciones mutuamente ortogonales alineadas con la estructural del material.

- Sin interacción entre ϵ y γ , ni entre σ y τ .
- En el caso tridimensional, requieren de 9 constantes elásticas:

E_x, E_y, E_z \longrightarrow E_i módulo de elasticidad a lo largo del eje i .

$\nu_{yz}, \nu_{xz}, \nu_{xy}$ \longrightarrow ν_{ij} coeficiente de Poisson que corresponde a la contracción en la dirección j cuando se aplica un estiramiento en la dirección i .

$$\nu_{ij} = -\frac{\epsilon_{\text{transversal}}}{\epsilon_{\text{longitudinal}}} = -\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i}$$

G_{yz}, G_{xz}, G_{xy} \longrightarrow G_{ij} módulo de cortante en el plano ij .

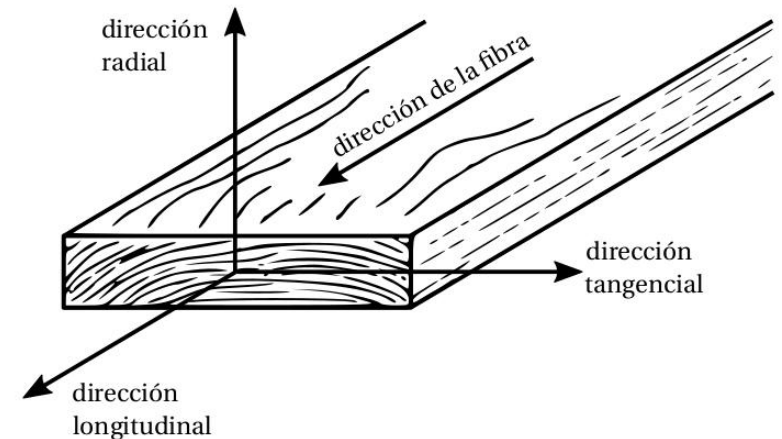


Figura 4.9: Direcciones de ortotropía de la madera. Las propiedades mecánicas de la madera se pueden describir con respecto a las direcciones longitudinales (paralela a la fibra), radiales (normal al crecimiento de los anillos) y tangenciales (a los anillos).

4.3.5. Ley de Hooke generalizada para materiales ortótropos

Deformaciones longitudinales y angulares son independientes

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zx}}{E_z} \sigma_z \\ \varepsilon_y = -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zy}}{E_z} \sigma_z \\ \varepsilon_z = -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz} \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy} \\ \gamma_{xz} = \frac{1}{G_{xz}} \tau_{xz} \end{array} \right.$$

Ley de Hooke generalizada para materiales ortótropos

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}}_{\varepsilon} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{pmatrix}}_S \underbrace{\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}}_{\sigma}$$

$$\nu_{yx} = \frac{E_y}{E_x} \nu_{xy} \quad \nu_{zx} = \frac{E_z}{E_x} \nu_{xz} \quad \nu_{zy} = \frac{E_z}{E_y} \nu_{yz}.$$

Simetría

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}}_{\sigma} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1-\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{yz}\nu_{zx}+\nu_{yx}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{yx}\nu_{zy}+\nu_{zx}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xz}\nu_{zy}+\nu_{xy}}{E_x E_z \Delta} & \frac{1-\nu_{xz}\nu_{zx}}{E_x E_z \Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{xy}\nu_{zx}}{E_x E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xy}\nu_{yz}+\nu_{xz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{\nu_{yz}+\nu_{xz}\nu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & \frac{1-\nu_{xy}\nu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xy} \end{pmatrix}}_D \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}}_{\varepsilon}$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{xz}\nu_{zx} - \nu_{xy}\nu_{yx} - 2\nu_{yx}\nu_{zy}\nu_{xz}}{E_x E_y E_z}$$

Matriz constitutiva de un material ortótropo

4.3.5. Ley de Hooke generalizada para materiales ortótropos

Con el objetivo de satisfacer ciertas restricciones termodinámicas, [Lempriere \(1968\)](#) demostró que las constantes asociadas a un material ortótropo deben satisfacer las siguientes desigualdades:

$$\begin{array}{lll} E_x > 0, & E_y > 0, & E_z > 0, \\ G_{yz} > 0, & G_{xz} > 0, & G_{xy} > 0, \\ 1 - \nu_{yz}\nu_{zy} > 0, & 1 - \nu_{xz}\nu_{zx} > 0, & 1 - \nu_{xy}\nu_{yx} > 0, \\ |\nu_{zy}| < \sqrt{\frac{E_z}{E_y}}, & |\nu_{yz}| < \sqrt{\frac{E_y}{E_z}}, & |\nu_{zx}| < \sqrt{\frac{E_z}{E_x}}, \\ |\nu_{xz}| < \sqrt{\frac{E_x}{E_z}}, & |\nu_{yx}| < \sqrt{\frac{E_y}{E_x}}, & |\nu_{xy}| < \sqrt{\frac{E_x}{E_y}}, \\ \Delta > 0, & \nu_{yx}\nu_{zy}\nu_{xz} < \frac{1 - \nu_{yx}^2 \frac{E_x}{E_y} - \nu_{zy}^2 \frac{E_y}{E_z} - \nu_{xz}^2 \frac{E_z}{E_x}}{2} < \frac{1}{2}. \end{array}$$

4.3.5. Ley de Hooke generalizada para materiales ortótropos

En ocasiones, las direcciones de ortotropía están alineadas con respecto a un sistema de coordenadas locales x' , y' , z' .

$$\boldsymbol{\sigma} = \underbrace{\mathbf{T}_{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{D}' \mathbf{T}_{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{\mathbf{D}} \boldsymbol{\varepsilon};$$

Materiales isótropos, anisótropos y ortótropos

4.4. Relación entre las direcciones principales asociadas a los esfuerzos y ...

(Relación entre las direcciones principales asociadas a los esfuerzos y a las deformaciones para materiales isótropos u ortótropos)

(Esta sección será de estudio autónomo)

4.5. Cambios de volumen y la dilatación cúbica

(Esta sección será de estudio autónomo)

4.6. Entendiendo el cambio de volumen de un sólido mediante el teorema de la divergencia

(Esta sección será de estudio autónomo)

4.7. Módulo de expansión volumétrica o módulo de compresibilidad

(Esta sección será de estudio autónomo)

4.8. Particularización de tres a dos dimensiones

4.8.1. Tensión plana

4.8.2. Deformación plana

4.8.3. Relación entre los esfuerzos principales obtenidos en el análisis bidimensional y tridimensional

4.8.1. Tensión plana

tensión plana

$$\sigma_z = 0$$

$$\tau_{xz} = 0$$

$$\tau_{yz} = 0$$

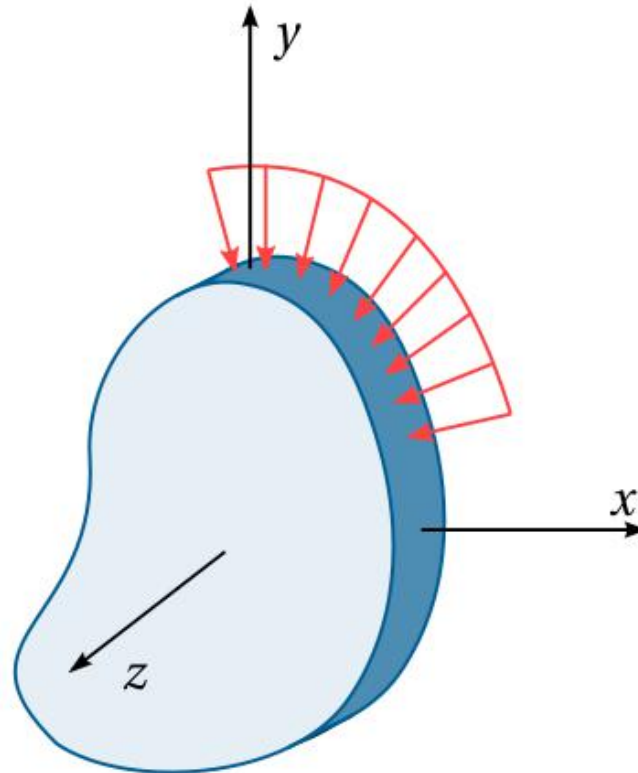


Figura 4.13: *Elemento en estado de tensión plana.*

4.8.2. Deformación plana

deformación plana

$$\varepsilon_z = 0$$

$$\gamma_{xz} = 0$$

$$\gamma_{yz} = 0$$

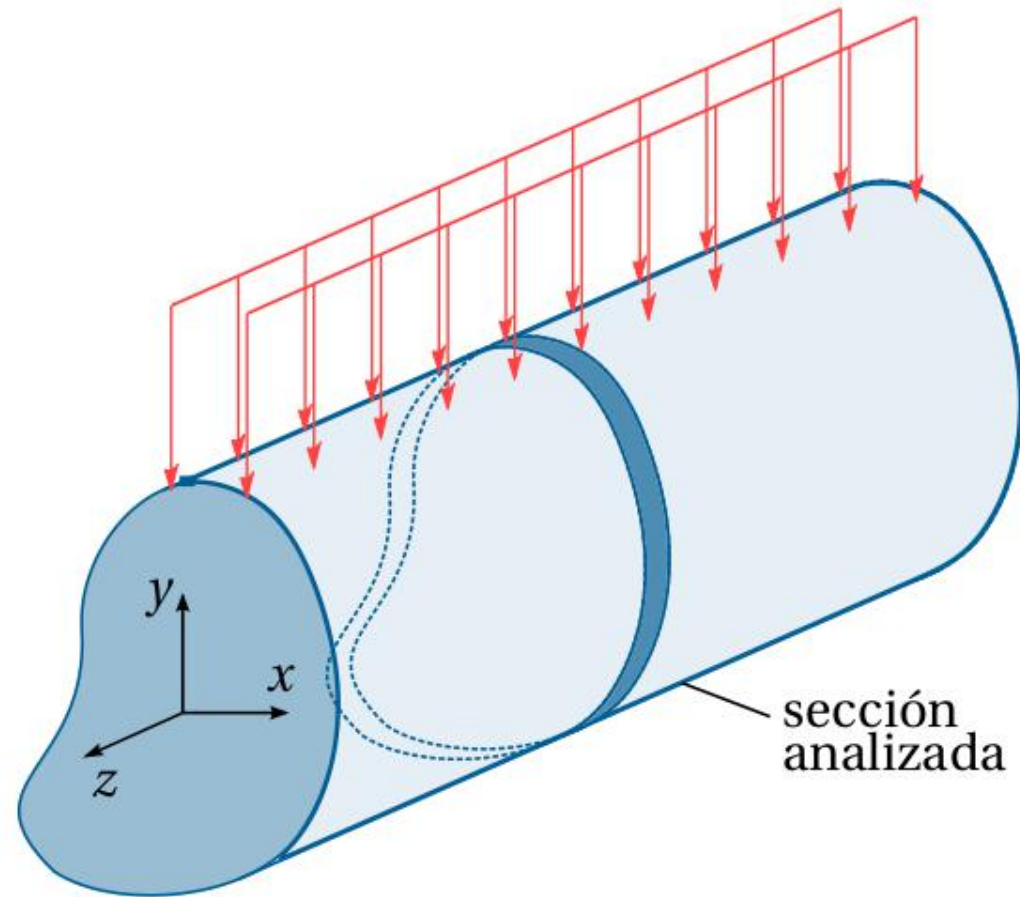


Figura 4.15: Elemento en estado de deformación plana.

4.8.3. Relación entre los esfuerzos principales obtenidos en el análisis bidimensional y tridimensional

4.9. Interpretación de los gráficos de colores de esfuerzos y deformaciones

4.9.1. Interpretación de los gráficos s_x , s_y y t_{xy}

4.9.2. Interpretación de los gráficos de las deformaciones e_x , e_y , e_z , g_{xy}

4.9.3. Interpretación de los gráficos de los esfuerzos principales y esfuerzo cortante máximo

4.9.4. Relación de los diagramas de colores de una viga con sus diagramas de cortante y momento

4.9.5. Disposición de los flejes si la viga estuviera hecha con concreto reforzado

4.9. Interpretación de los gráficos de esfuerzos y deformaciones

4.9.1. Interpretación de los gráficos de esfuerzos s_x , s_y y t_{xy}

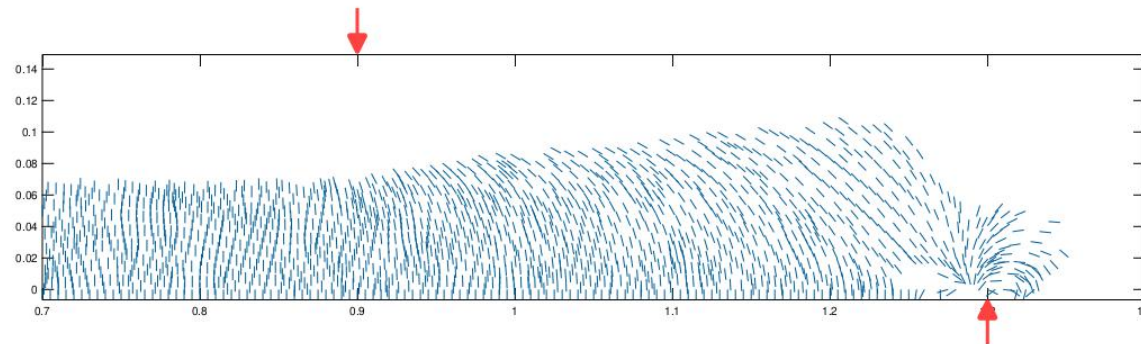
4.9.2. Interpretación de los gráficos de las deformaciones

e_x , e_y , e_z , g_{xy}

4.9.3. Interpretación de los gráficos de los esfuerzos principales y esfuerzo cortante máximo



Figura 4.24: Grietas en una viga de concreto reforzado de 140 cm de longitud, 15 cm de altura y 10 cm de ancho. La viga aquí mostrada es una doblemente reforzada (acero longitudinal superior e inferior); adicionalmente, tiene flejes en los tercios extremos, es decir, el tercio central de la luz no tiene flejes. Los apoyos están separados 120 cm y las cargas puntuales, las cuales son de igual magnitud, se aplicaron a 40 cm de los apoyos. La foto superior muestra el patrón de agrietamiento de dicha viga; la foto intermedia es un acercamiento de la mitad derecha; la figura inferior muestra el ángulo de inclinación θ_2 para aquellas posiciones en las cuales el esfuerzo $(\sigma_1)_{xy}$ es mayor que la resistencia a tracción del concreto f_t , es decir, $(\sigma_1)_{xy} > f_t$; dicho patrón de agrietamiento se calculó mediante un programa de elementos finitos, asumiendo que el material de la viga tiene un comportamiento lineal elástico. Observe que el patrón de agrietamiento de la viga coincide, en gran medida, con aquel dado por las inclinaciones θ_2 . Estas fotografías fueron tomadas por el autor en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales; los ensayos fueron realizados por el profesor Juan Pablo Herrera Castaño y sus alumnos en el curso Diseño de Estructuras de Concreto I.



4.9.4. Relación de los diagramas de colores de una viga con sus diagramas de cortante y momento

4.9.5. Disposición de los flejes si la viga estuviera hecha con concreto reforzado

4.10. Modificación de la ley de Hooke para tener en cuenta los efectos térmicos en el caso de materiales isótropos

4.10.1. Deformaciones térmicas en el caso de tensión plana

4.10.2. Deformaciones térmicas en el caso de deformación plana

4.10.3. Ejercicio: dos pastillas sometidas a un esfuerzo vertical

4.10. Modificación de la ley de Hooke para tener en cuenta los efectos ...

(Modificación de la ley de Hooke para tener en cuenta los efectos térmicos en el caso de materiales isótropos)

4.10.1. Deformaciones térmicas en el caso de tensión plana

(Esta sección será de estudio autónomo)

4.10.2. Deformaciones térmicas en el caso de deformación plana

(Esta sección será de estudio autónomo)

4.10.3. Ejercicio: dos pastillas sometidas a un esfuerzo vertical

(Esta sección será de estudio autónomo)

Referencias

- Álvarez Diego A. (2022) - *Notas de clase del curso mecánica de sólidos*. En preparación. (main.pdf)