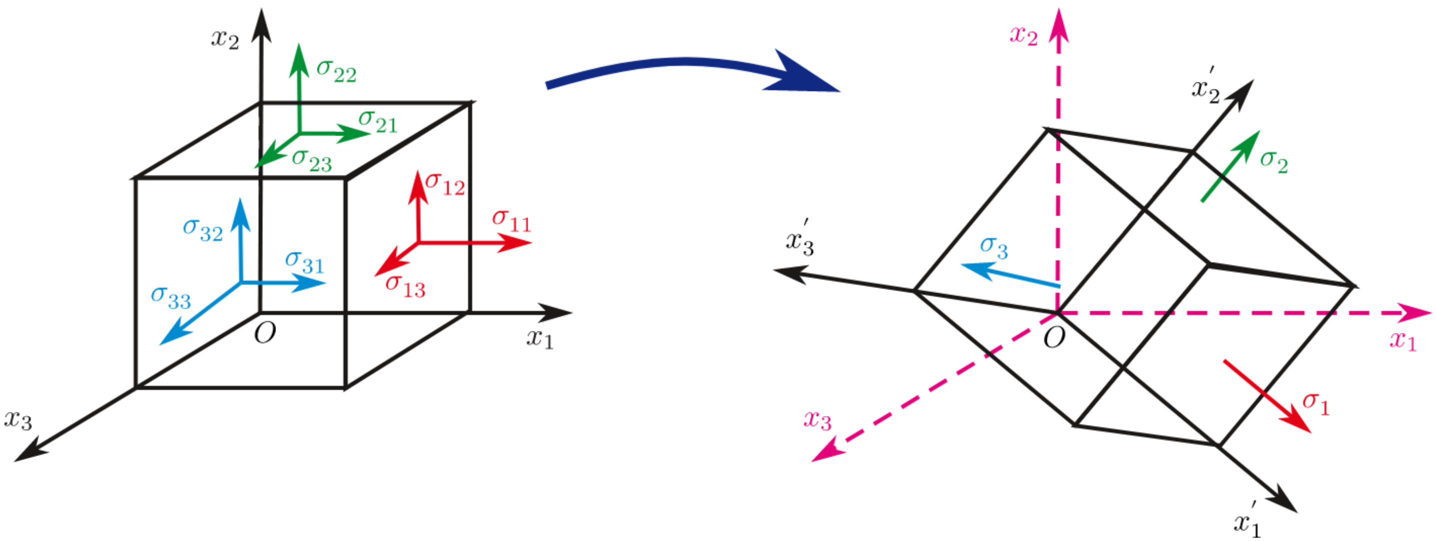
Estado de Tensión



Clara Zaccaria – Catalina Urteneche

Universidad de Buenos Aires

Estabilidad II

Repaso teórico

Axil: $$\sigma_x = \frac{N}{A}$$

Flexión: $$\sigma_x = \frac{M_{LN} \cdot v_{LN}}{J_{LN}}$$

Torsión: $$\tau = \frac{M_T \cdot dist}{J_{ToP}}$$ τ_{xy} o τ_{xz}

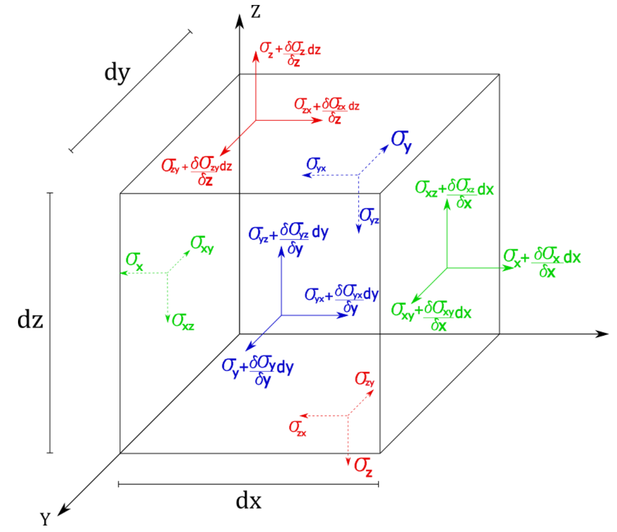
Corte: $$\tau = \frac{Q_{LFQ} \cdot S_{LNQ}}{J_{LNQ} \cdot b}$$ τ_{xy} o τ_{xz}

$$T_T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \longrightarrow T_T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & 0 & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Repaso teórico

$$\begin{pmatrix}\rho_x\\ \rho_y\\ \rho_z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx}\\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy}\\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\cos(\alpha)\\ \cos(\beta)\\ \cos(\gamma)\end{pmatrix}$$

$$\bar{\rho}=[T_T]\cdot\check{n}$$



Por el teorema de Cauchy: $\tau_{xz}=\tau_{zx}$ $\quad\tau_{xy}=\tau_{yx}$ $\quad\tau_{yz}=\tau_{zy}$

$$T_T=\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz}\\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z\end{bmatrix}$$

$$\bar{\rho}=[T_T]\cdot\check{n}\qquad \sigma_n=\bar{\rho}\cdot\check{n}\qquad \overline{\sigma_n}=\sigma_n\,\check{n}\qquad \overline{\tau_n}=\bar{\rho}-\overline{\sigma_n}$$

Dirección principal es cuando $\bar{\rho}=\overline{\sigma_n}$ $\quad\overline{\tau_n}=0$ $\quad[T_T]\cdot\check{n}=\sigma_n\,\check{n}$

Tensiones y direcciones principales

$$[T_T] \cdot \breve{n}_i = \sigma_i \, \breve{n}_i \quad \longrightarrow \quad ([T_T] - \sigma_i \, [I]) \cdot \breve{n}_i = \bar{0} \quad \longrightarrow \quad det([M]) = 0$$

Las dirección $\breve{n}_i$ son las direcciones principales, y son los autovectores de $[T_T]$

σ_i son las tensiones principales, y son los autovalores de $[T_T]$

$$det([M]) = {\sigma_i}^3 - I_1 \, {\sigma_i}^2 + I_2 \, \sigma_i - I_3 = 0$$

Invariantes: $I_1 = tr(T_T)$ $\quad I_2 = {}^1\!/_2 \left({I_1}^2 - tr([T_T] \cdot [T_T]) \right)$ $\quad I_3 = det(T_T)$

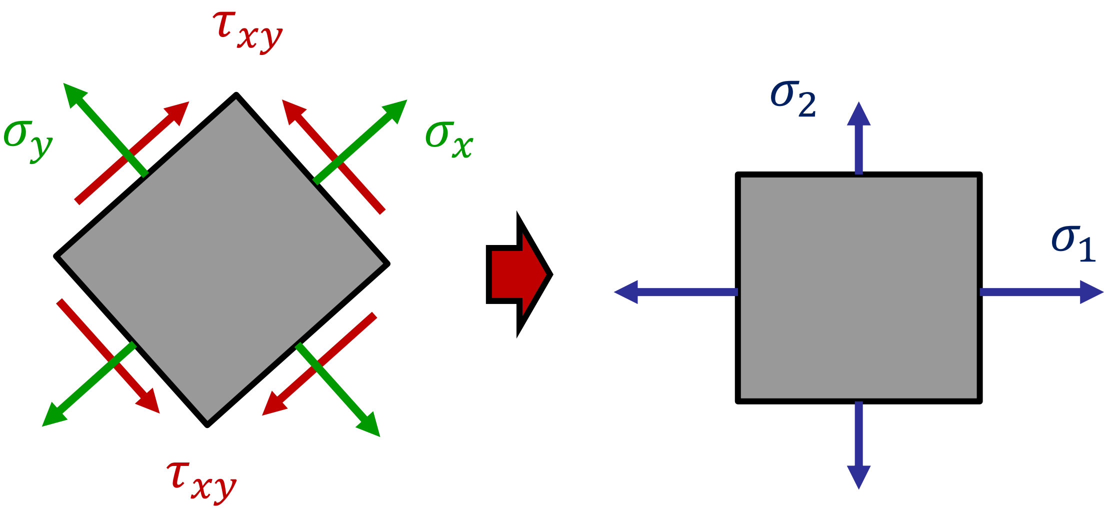
Clasificación del estado tensional:

$I_3 \neq 0$ $\longrightarrow$ Estado triple o espacial (Ninguna tensión principal es igual a cero)

$I_3 = 0$ y $I_2 \neq 0$ $\longrightarrow$ Estado doble o plano (Una tensión principal es igual a cero)

$I_3 = 0$ y $I_2 = 0$ y $I_1 \neq 0$ $\longrightarrow$ Estado simple o uniaxial (Dos tensiones principales son iguales a cero)

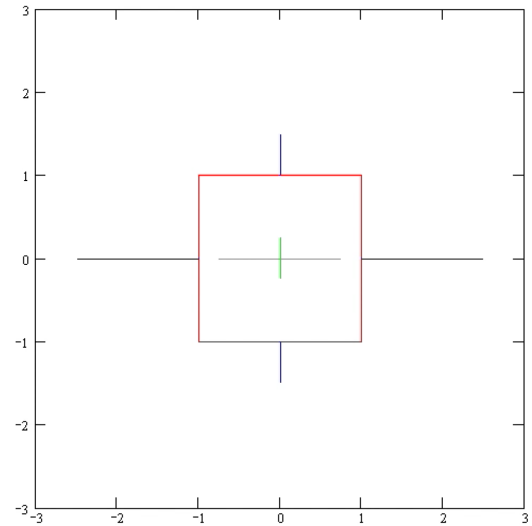
Ejes principales para estado plano



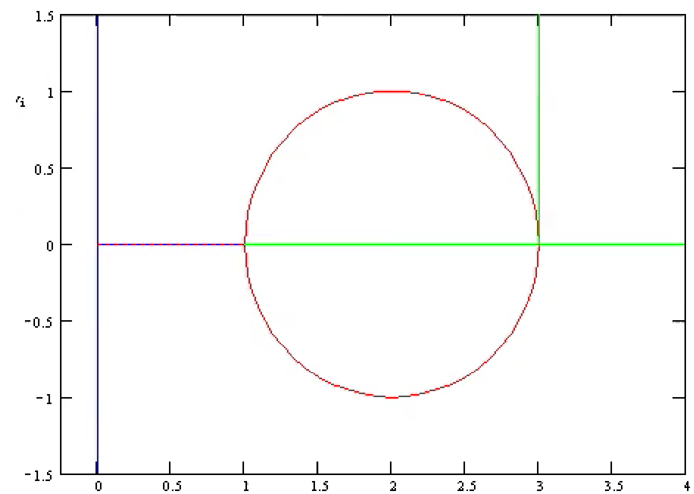
$$T_T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix}$$

$$T_T = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix}$$

Las tensiones principales son los valores máximos y mínimos que tiene mi estado tensional



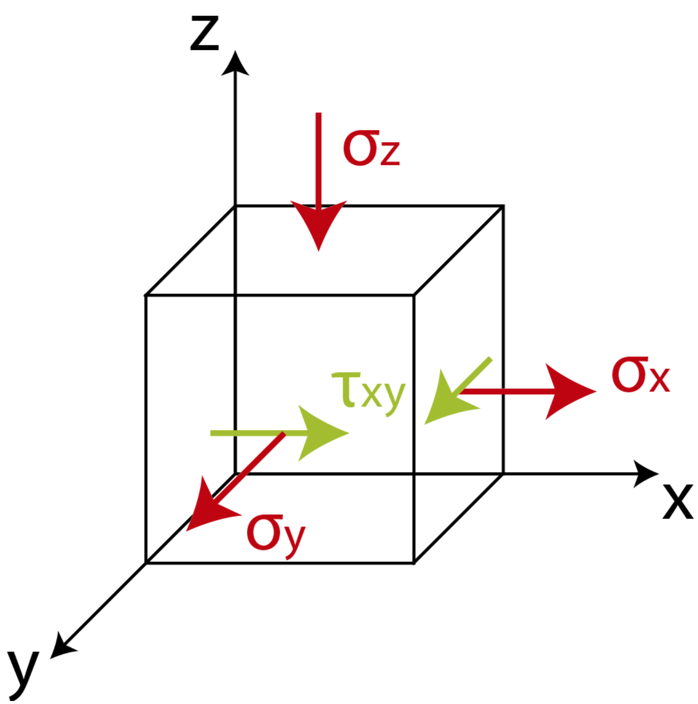
Estado de tensión



Circunferencia de Mohr

Ejercicio 1: Para el punto "A" de un sólido

1) Determinar las tensiones principales.
2) Determinar las direcciones principales 1, 2 y 3 calculando los cosenos directores.
3) Ídem gráficamente aplicando la construcción de Mohr.



Datos:

- $\sigma_x = 10\ MPa$
- $\sigma_y = 10\ MPa$
- $\sigma_z = 20\ MPa$
- $\tau_{xy} = \tau_{yx} = 10\ MPa$

- $E = 200000\ MPa$
- $\mu = 0{,}25$
- $G = \frac{E}{2\cdot(1+\mu)} = 8 \cdot 10^4\ MPa$

1) Determinar las tensiones principales.

$$[T_T]_{XYZ} = \begin{pmatrix} \sigma_X & \tau_{YX} & \tau_{ZX} \\ \tau_{XY} & \sigma_Y & \tau_{ZY} \\ \tau_{XZ} & \tau_{YZ} & \sigma_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & 10 & 0 \\ 10 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & -20 \end{pmatrix}$$

Planteando la ecuación de Lagrange: $\sigma_i^3 - I_1 \cdot \sigma_i^2 + I_2 \cdot \sigma_i - I_3 = 0$

$$I_1 = \sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z$$

$$I_2 = \sigma_X \cdot \sigma_Y - \tau_{XY}^2 + \sigma_Y \cdot \sigma_Z - \tau_{YZ}^2 + \sigma_X \cdot \sigma_Z - \tau_{XZ}^2$$

$$I_3 = \sigma_X \cdot \sigma_Y \cdot \sigma_Z + 2 \cdot \tau_{XY} \cdot \tau_{YZ} \cdot \tau_{XZ} - \sigma_X \cdot \tau_{YZ}^2 - \sigma_Y \cdot \tau_{XZ}^2 - \sigma_Z \cdot \tau_{XY}^2$$

¡Observación!

I_2 es la suma de los determinantes menores de $[T_T]$ y I_3 es el determinante de $[T_T]$

Autovalores de $[T_T]$

$$\sigma_1 = 20\ MPa$$
$$\sigma_2 = 0$$
$$\sigma_3 = -20\ MPa$$

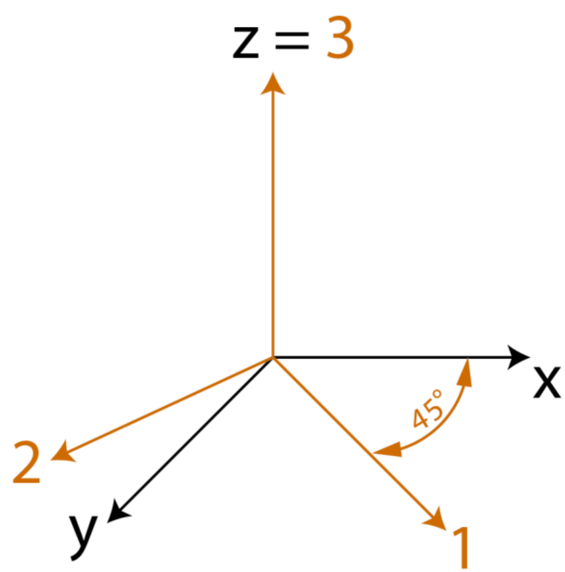
$$[T_T]_{123} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -20 \end{pmatrix}$$

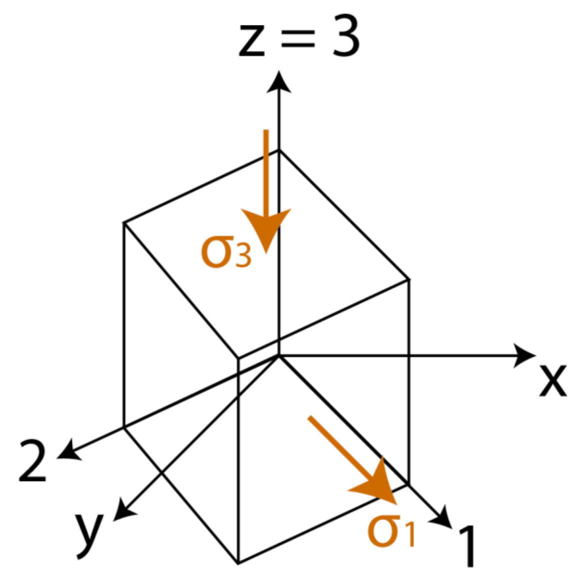
2) Determinar las direcciones principales 1, 2 y 3 calculando los cosenos directores.

$$\{[T_T]_{XYZ} - \sigma_i \cdot [I]\} \cdot \widehat{v_i} = 0 \qquad \text{(con } i = 1,2,3\text{)}$$

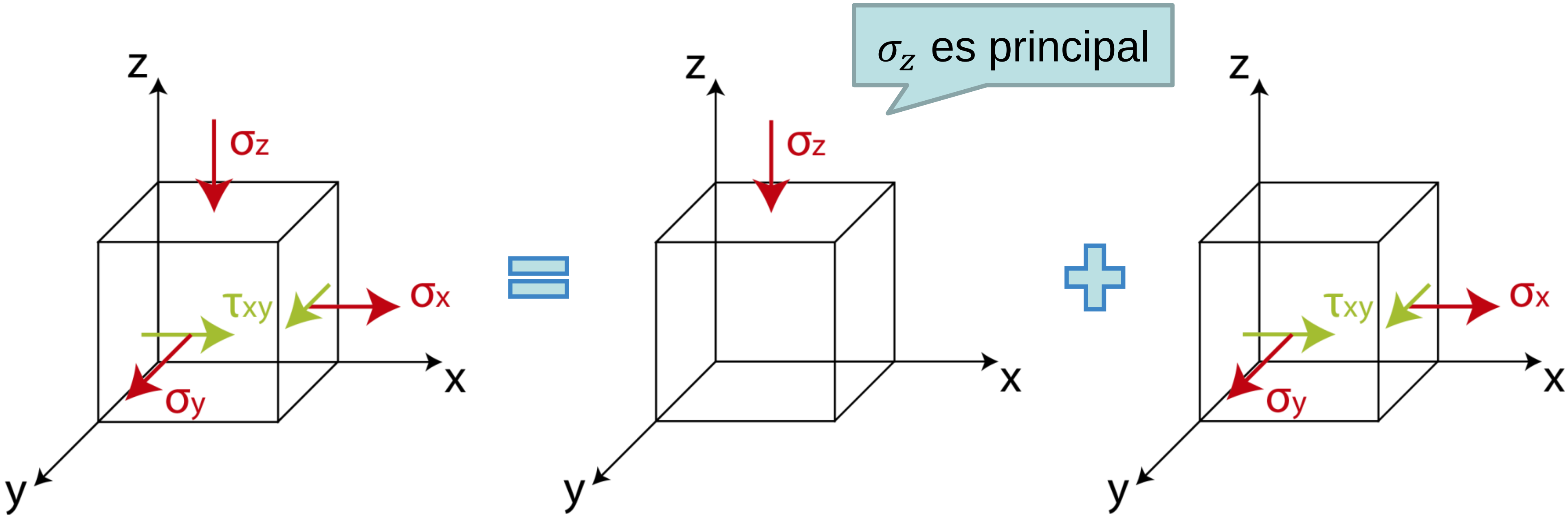
$$\widehat{v_1} = \begin{pmatrix} 0,707 \\ 0,707 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \widehat{v_2} = \begin{pmatrix} -0,707 \\ 0,707 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \widehat{v_3} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Autovectores de $[T_T]$

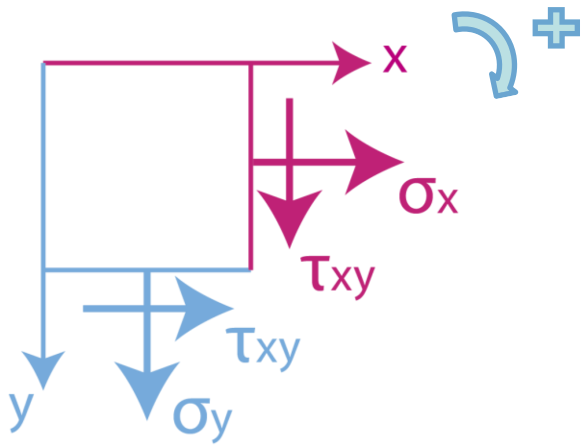




3) Ídem gráficamente aplicando la construcción de Mohr.

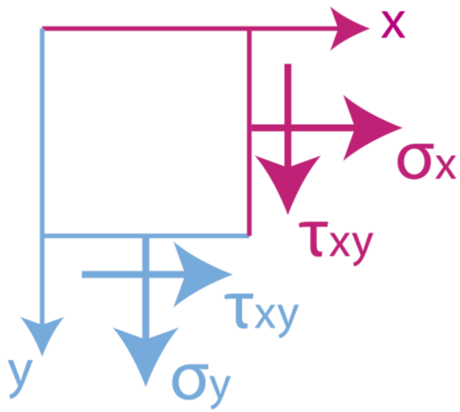


Construimos la circunferencia de Mohr del Estado Plano:

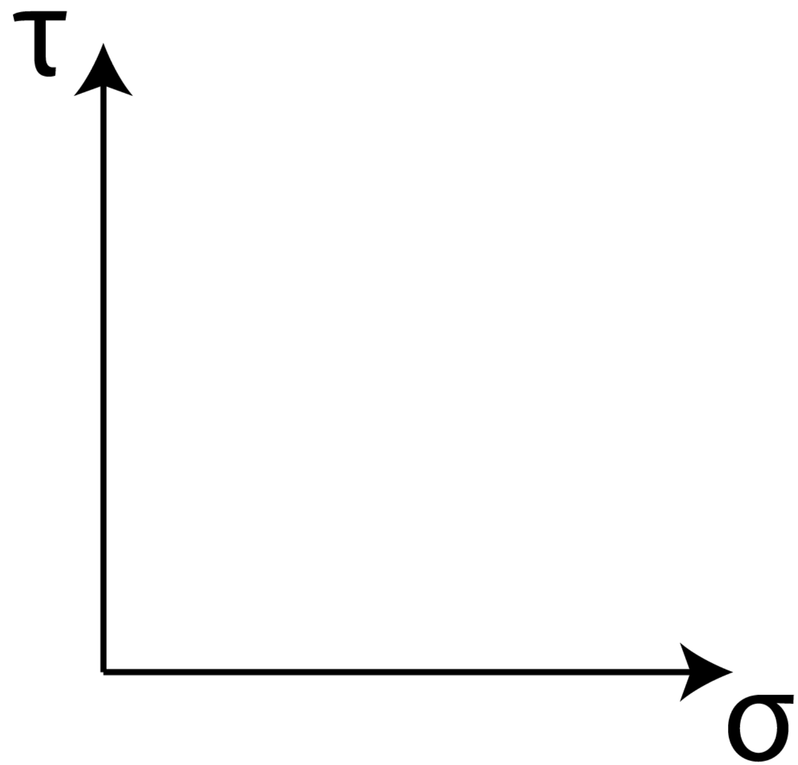


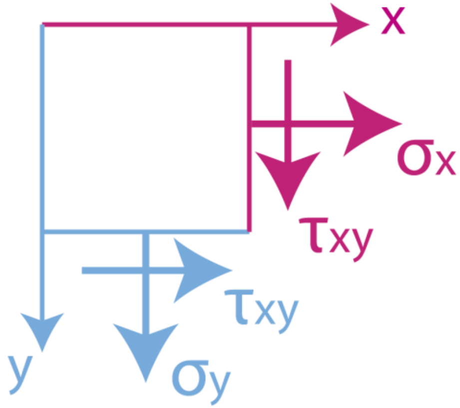
¡Observación!

Para determinar el signo de τ nos fijamos qué giro le producen al cubo

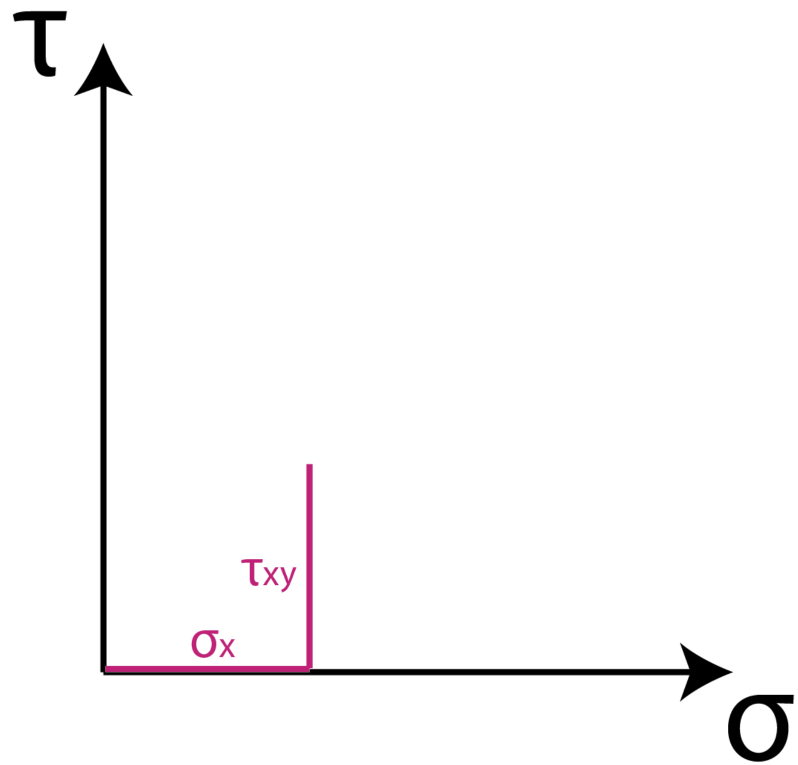


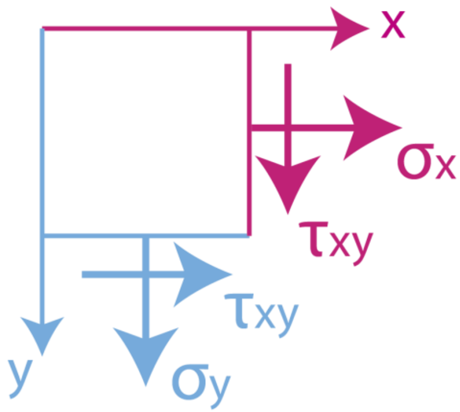
$$[T_T]_{XYZ} = \begin{pmatrix} 10 & 10 & 0 \\ 10 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & -20 \end{pmatrix}$$



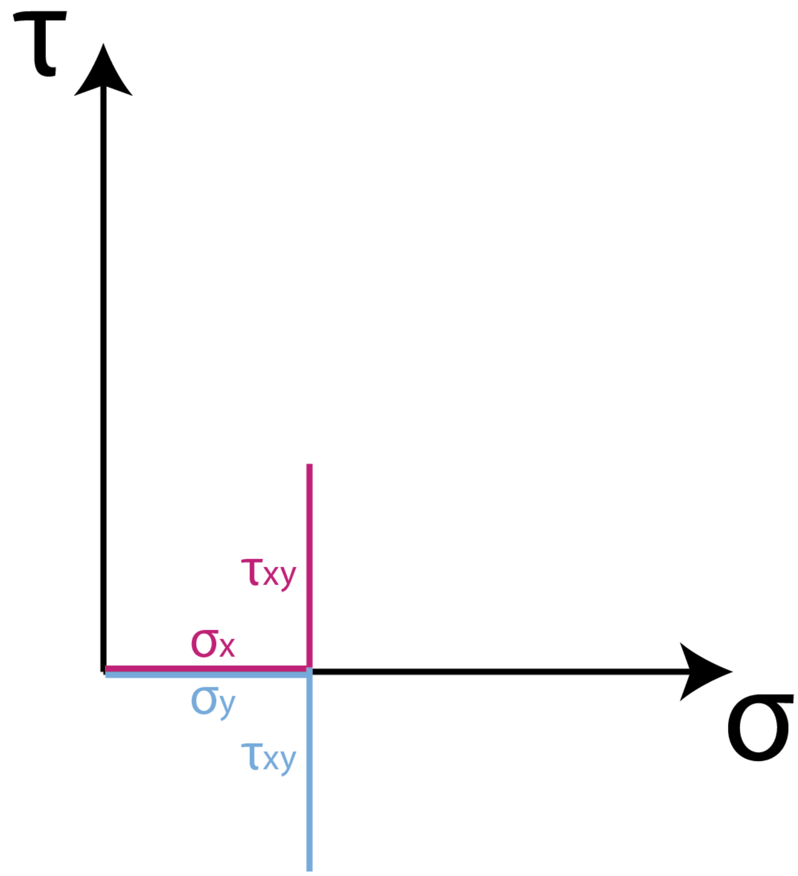


$$[T_T]_{XYZ} = \begin{pmatrix} 10 & 10 & 0 \\ 10 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & -20 \end{pmatrix}$$

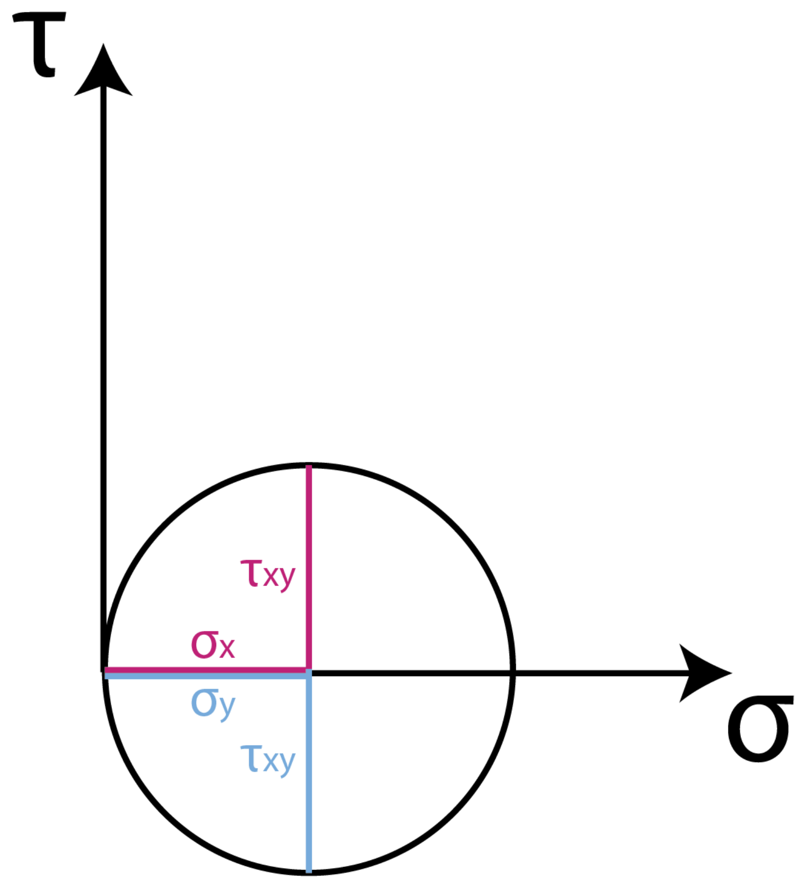


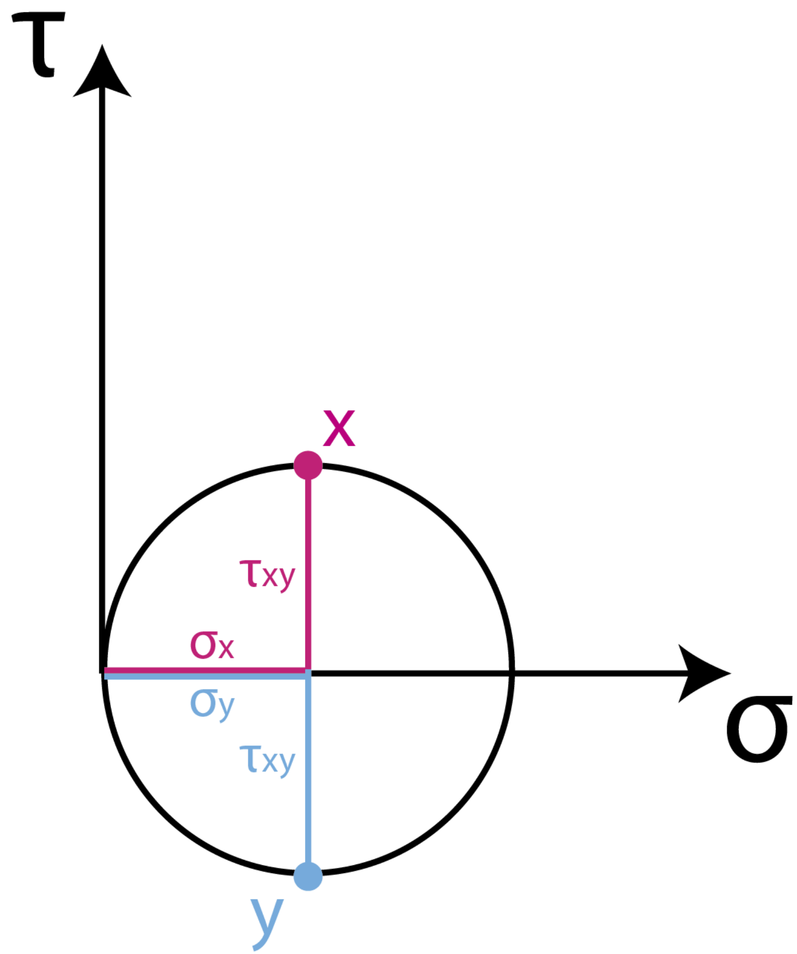


$$[T_T]_{XYZ} = \begin{pmatrix} 10 & 10 & 0 \\ 10 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & -20 \end{pmatrix}$$

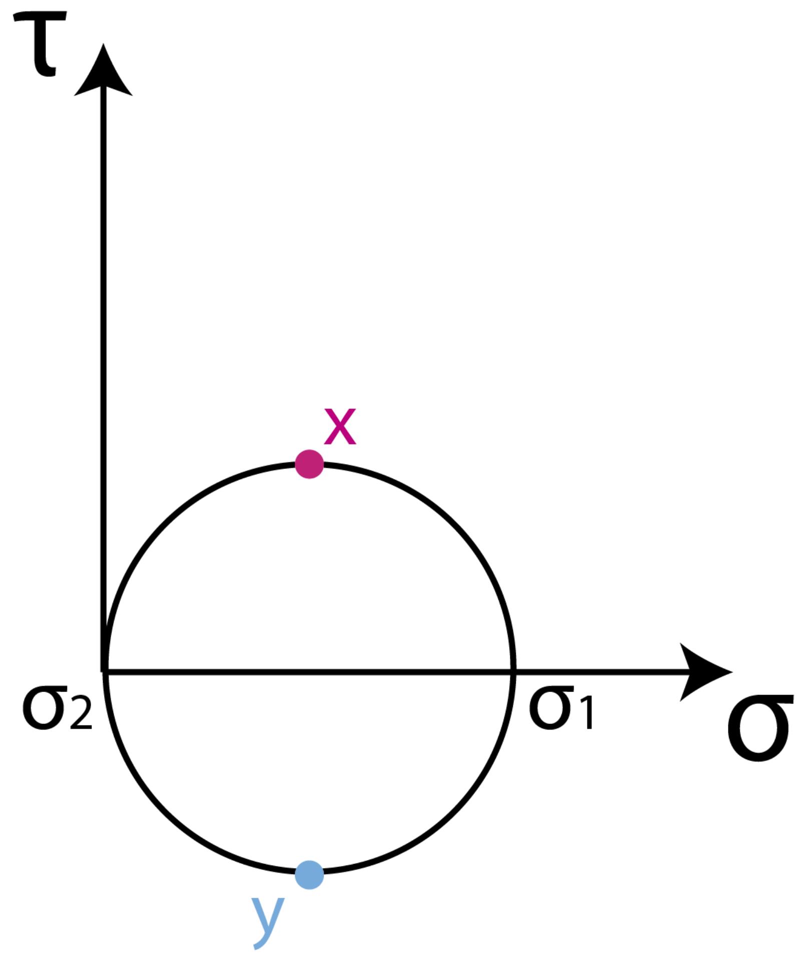


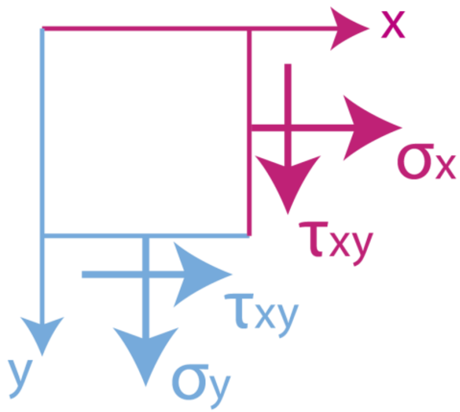
Trazamos la circunferencia de modo tal que pase por los puntos que representan las tensiones del cubo elemental

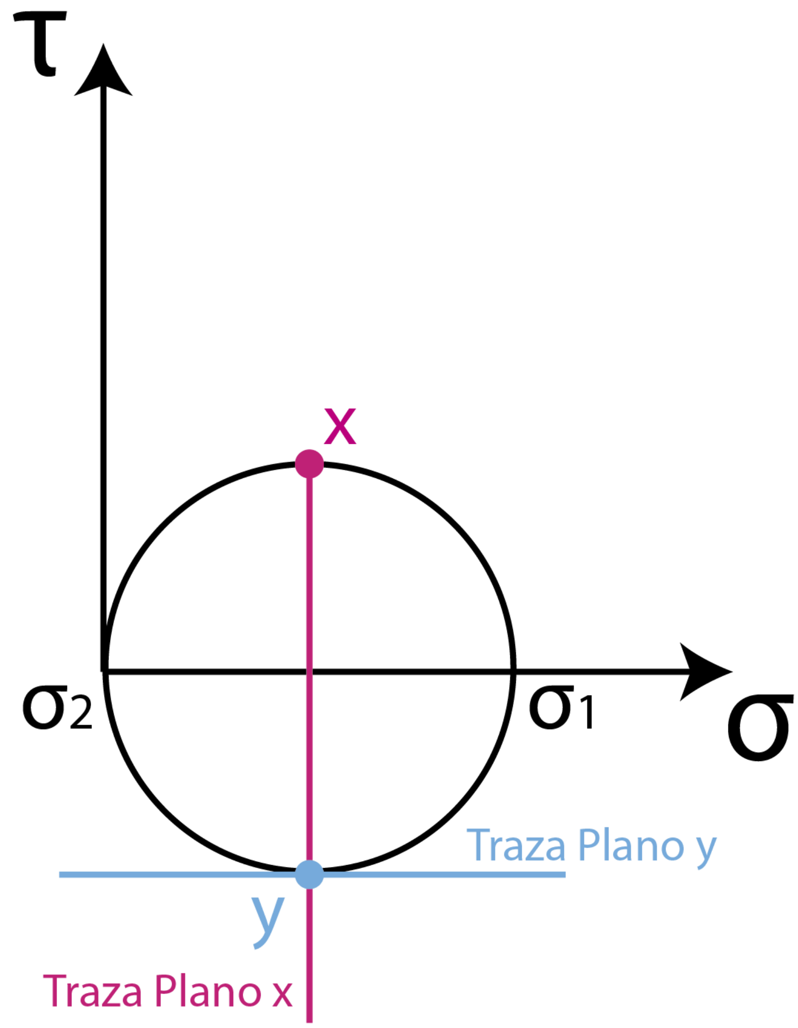



τ
x
τxy
σx
σy
τxy
y
σ

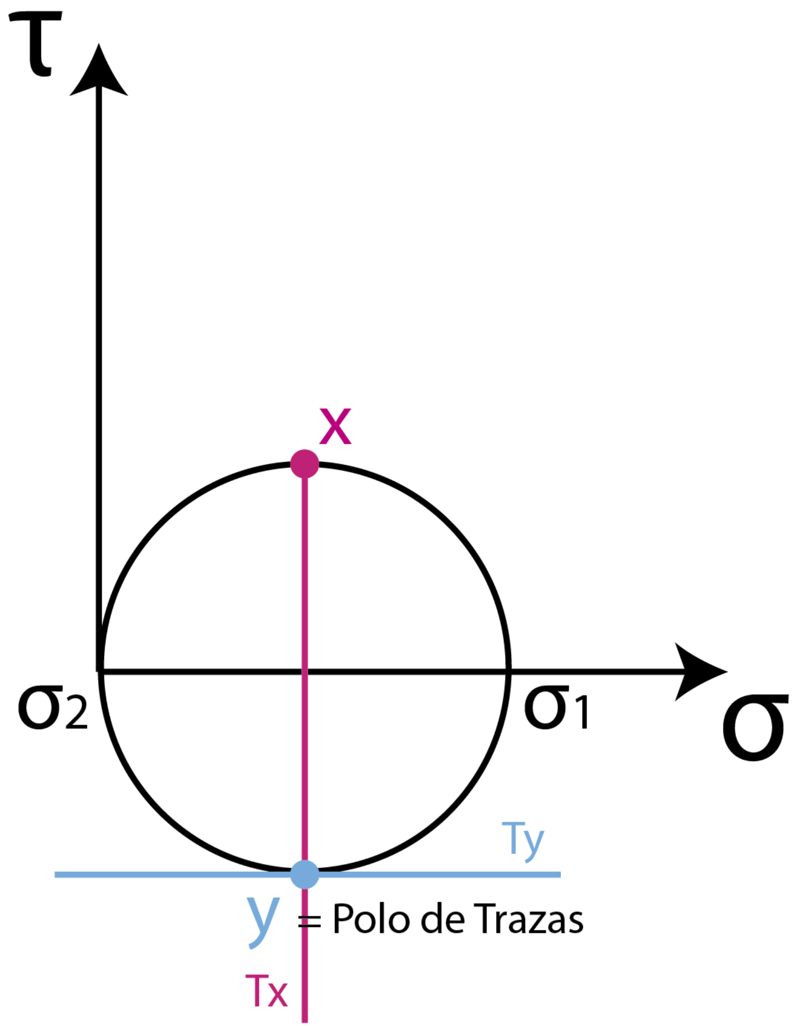
Donde la circunferencia interseca con el eje σ estarán σ_1 y σ_2

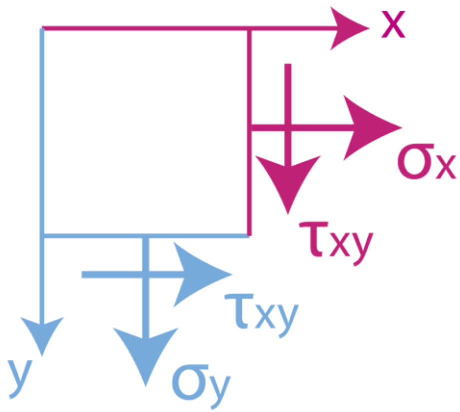


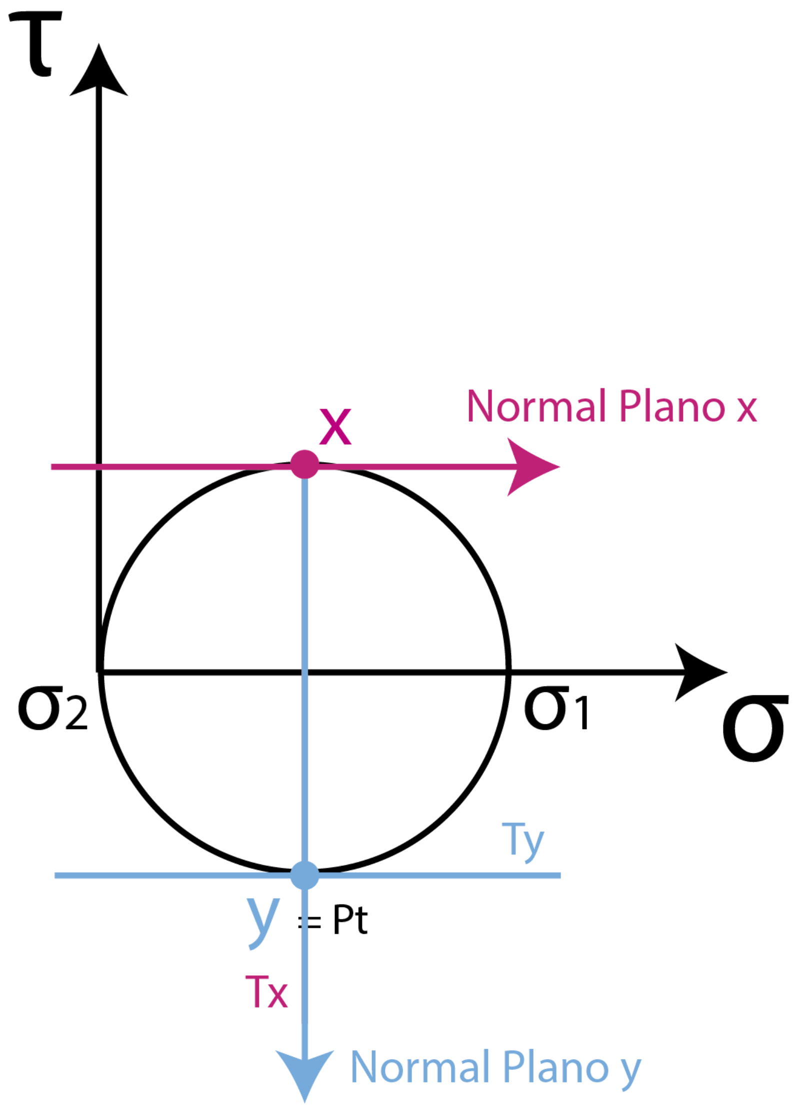

x
σx
τxy
τxy
y
σy


τ
x
σ2
σ1
σ
Traza Plano y
y
Traza Plano x

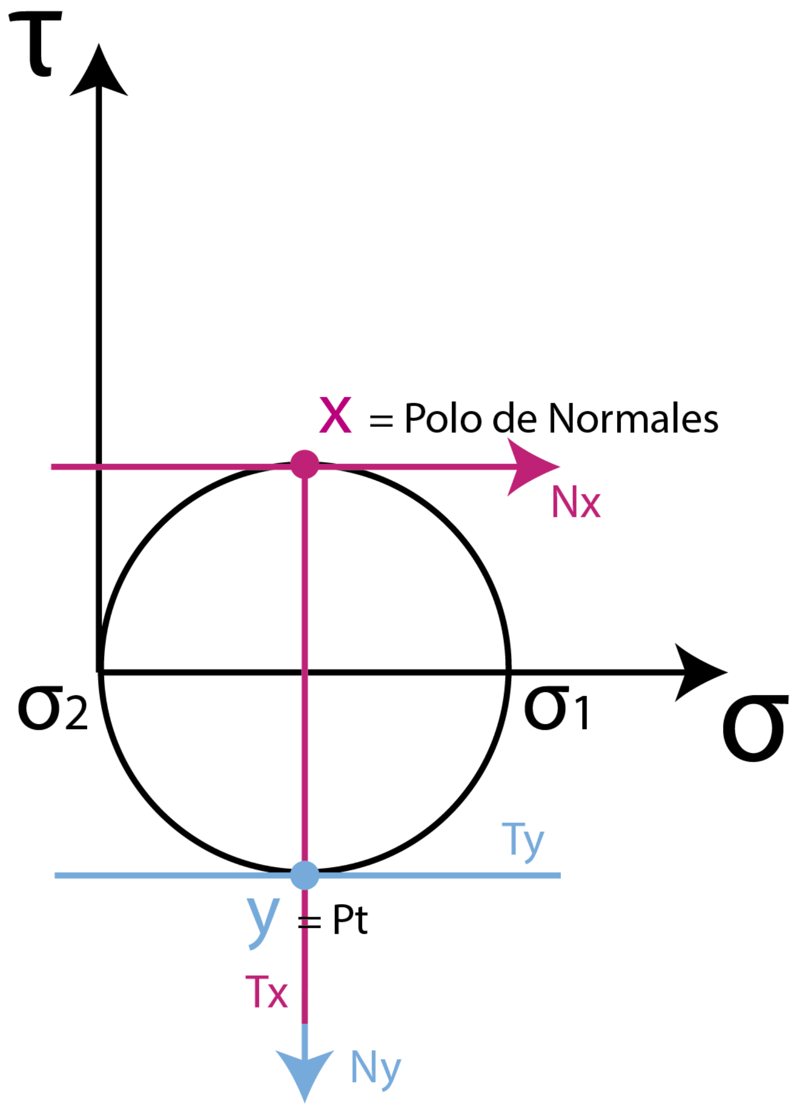
En la intersección de las trazas de los planos se encuentra el polo de trazas



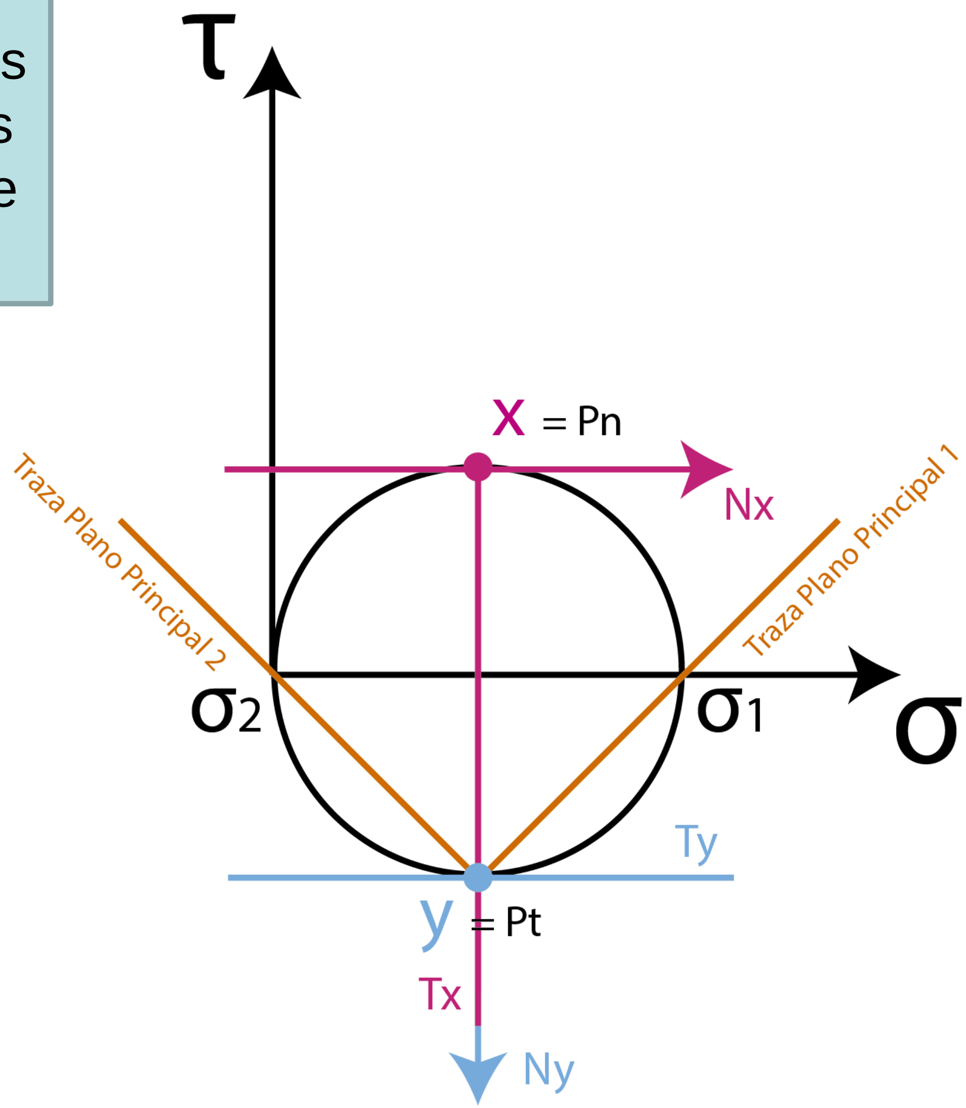

x
σx
τxy
τxy
y
σy


τ
Normal Plano x
x
σ2
σ1
σ
Ty
y
= Pt
Tx
Normal Plano y

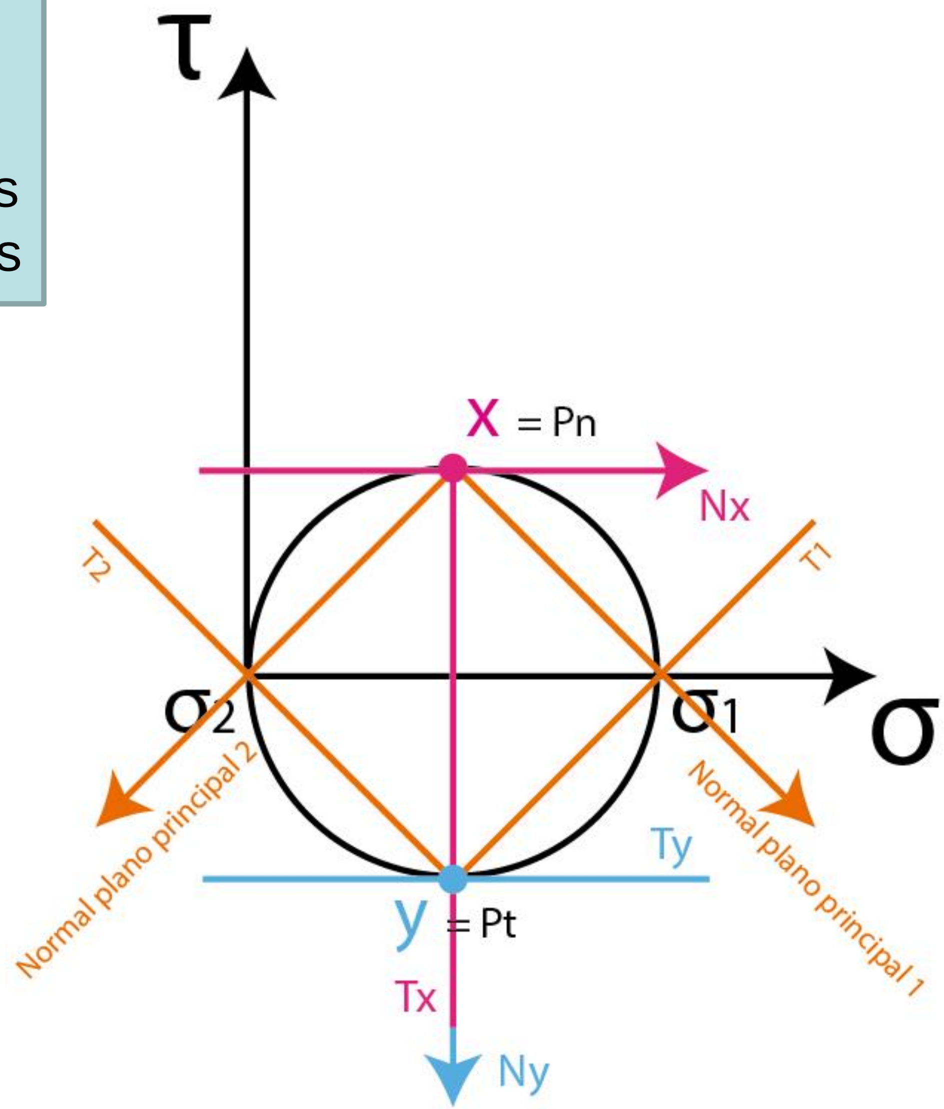
En la intersección de las normales de los planos se encuentra el polo de normales

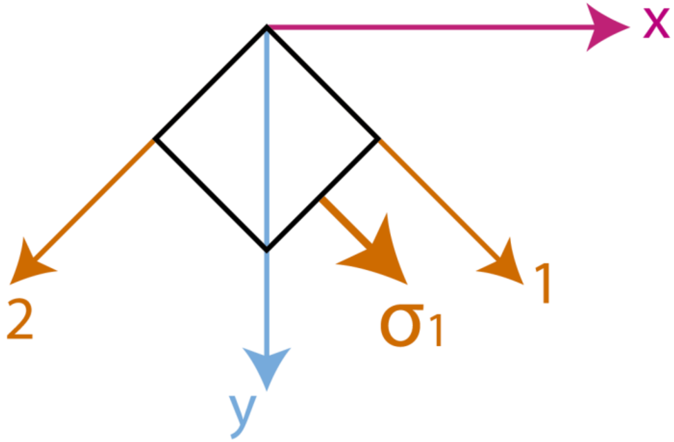


Uniendo el polo de trazas con los puntos que representan las tensiones de los planos principales se obtienen las trazas de dichos planos

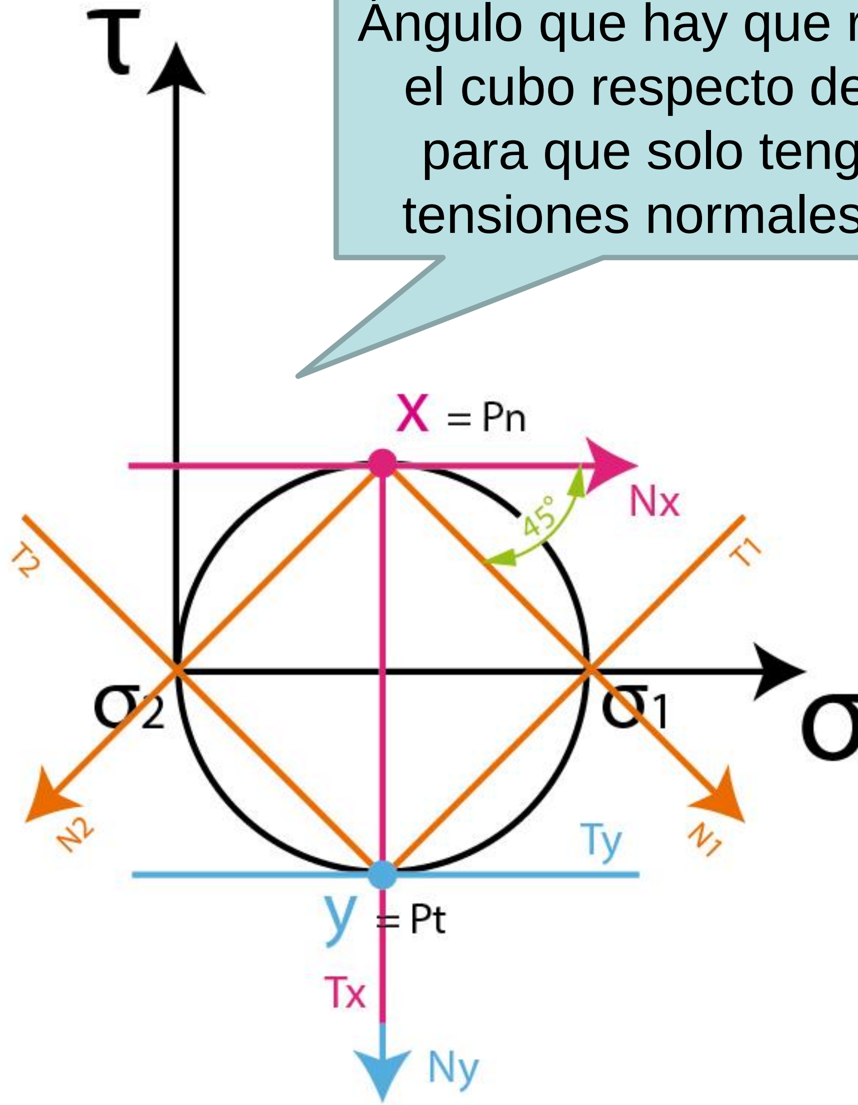


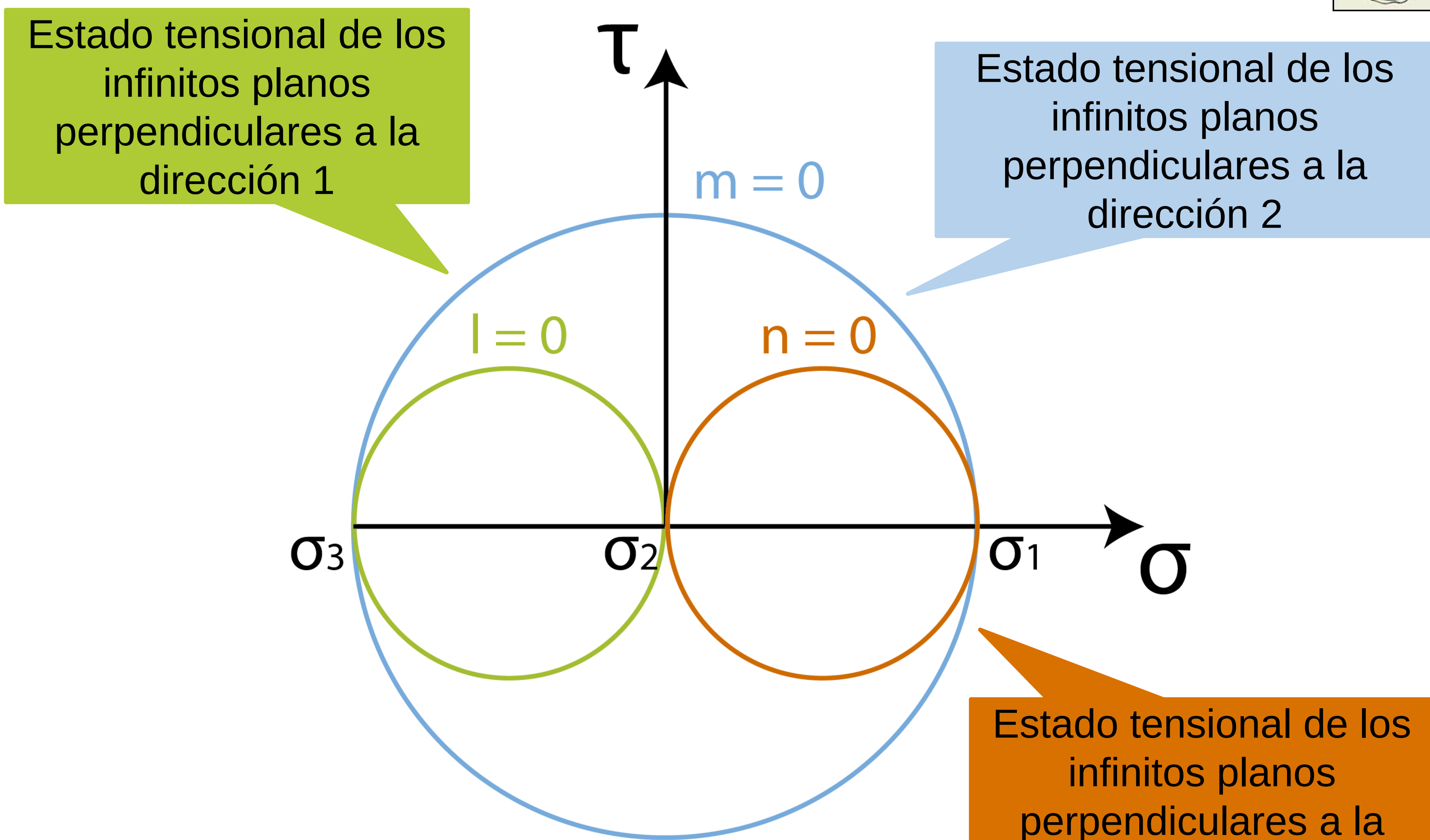
Uniendo el polo de normales con los puntos que representan las tensiones de los planos principales se obtienen las normales de dichos planos



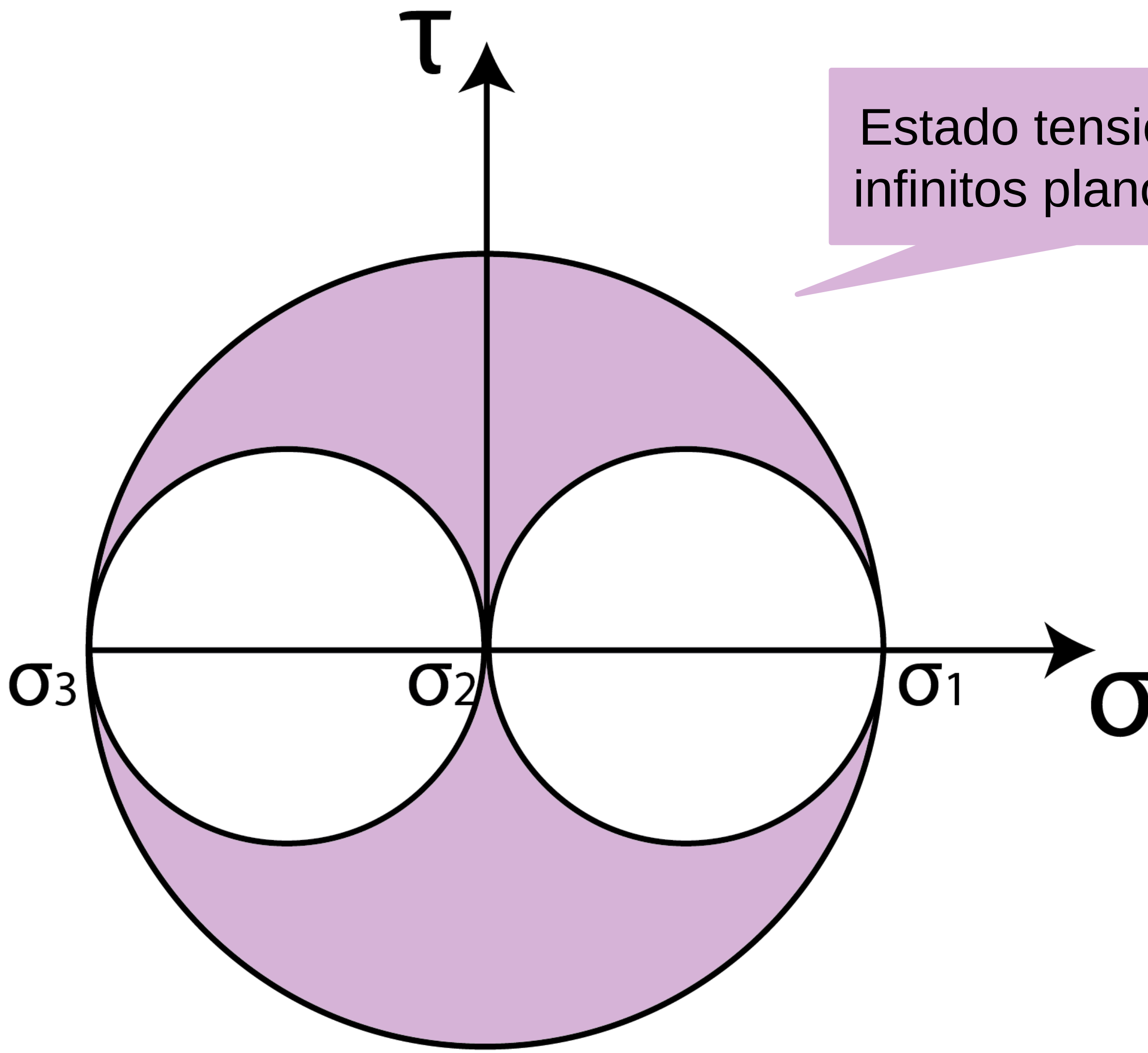


Ángulo que hay que rotar el cubo respecto de x para que solo tenga tensiones normales σ

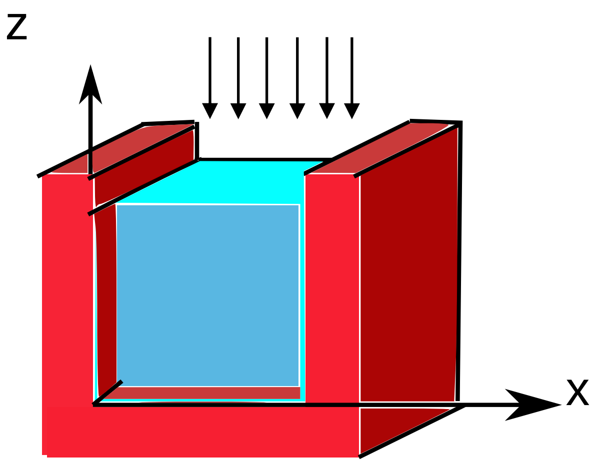


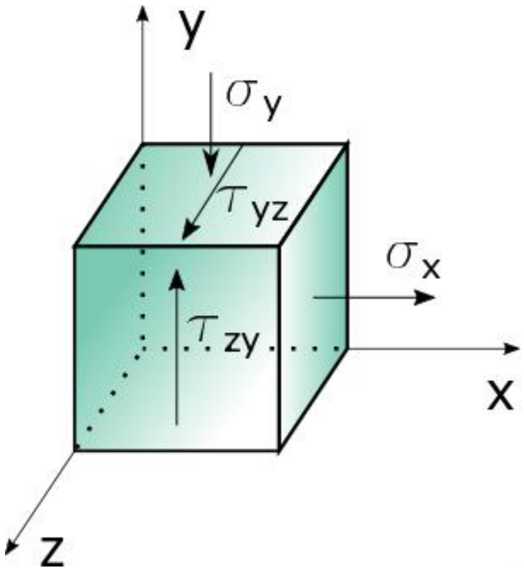

Estado tensional de los infinitos planos perpendiculares a la dirección 1
Estado tensional de los infinitos planos perpendiculares a la dirección 2
Estado tensional de los infinitos planos perpendiculares a la dirección 3
τ
σ
m = 0
l = 0
n = 0
σ3
σ2
σ1

Estado tensional de los infinitos planos posibles



Estado de Deformaciones y Relaciones Constitutivas





Tania Poletilo - Manuela Medina - Constanza Ruffinelli

Universidad de Buenos Aires

Estabilidad II

Repaso teórico

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{\partial u}{\partial x} \\ \dfrac{\partial v}{\partial y} \\ \dfrac{\partial w}{\partial z} \\ \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u}{\partial z} + \dfrac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial z}\right) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{n_x} \\ \varepsilon_{n_y} \\ \varepsilon_{n_z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \cos(\beta) \\ \cos(\gamma) \end{pmatrix} \qquad \overline{\varepsilon_n} = [T_D] \cdot \check{n}$$

$$\overline{\varepsilon_n} = [T_D] \cdot \check{n} \qquad \varepsilon_l = \overline{\varepsilon_n} \cdot \check{n}$$

$$\overline{\varepsilon_l} = \varepsilon_l \ \check{n} \qquad \overline{\varepsilon_t} = \overline{\varepsilon_n} - \overline{\varepsilon_l}$$

Dirección principal es cuando $\overline{\varepsilon_n} = \overline{\varepsilon_l}$

$$[T_D] \cdot \check{n} = \varepsilon_l \ \check{n}$$

Deformaciones y direcciones principales

$$[T_D] \cdot \breve{n}_i = \varepsilon_i \, \breve{n}_i \quad \longrightarrow \quad ([T_D] - \varepsilon_i \, [I]) \cdot \breve{n}_i = \underline{0} \quad \longrightarrow \quad det([M]) = 0$$

Las direcciones principales son los autovectores de $[T_D]$, y son las mismas que $[T_T]$

y $|\varepsilon_i|$ son las deformaciones principales, y son los autovalores de $[T_D]$

$$det([M]) = {\varepsilon_i}^3 - I_1 \, {\varepsilon_i}^2 + I_2 \, \varepsilon_i - I_3 = 0$$

Invariantes: $I_1 = tr(T_D)$ $\quad I_2 = {}^1\!/_2 \left({I_1}^2 - tr([T_D] \cdot [T_D]) \right)$ $\quad I_3 = det(T_D)$

$\varepsilon_V = tr(T_D)$

Clasificación del estado de deformaciones:

$I_3 \neq 0$ $\longrightarrow$ Estado triple (Ninguna deformación principal es igual a cero)

$I_3 = 0$ y $I_2 \neq 0$ $\longrightarrow$ Estado doble (Una deformación principal es igual a cero)

$I_3 = 0$ y $I_2 = 0$ y $I_1 \neq 0$ $\longrightarrow$ Estado simple (Dos deformaciones principales son iguales a cero)

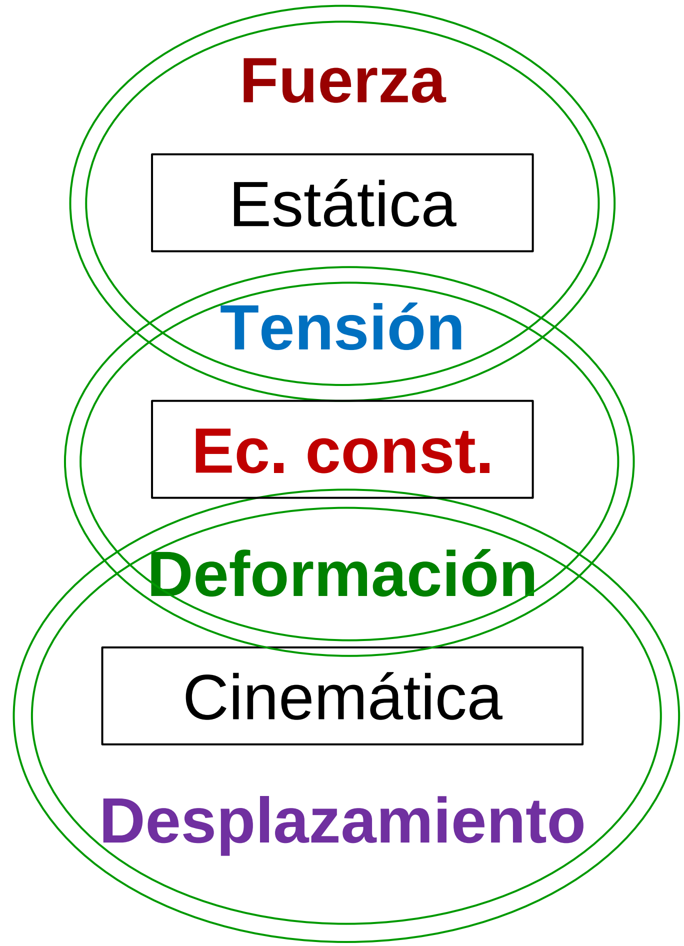
Ecuaciones constitutivas

La estática relaciona fuerza con tensión (cualquier material)

La cinemática relaciona desplazamiento con deformación (cualquier material)

Las ecuaciones constitutivas relacionan tensión con deformación (dependen del material)

Las ecuaciones constitutivas cierran la cadena de cálculo



Relaciones para materiales Isótropos

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\ \varepsilon_{xy} \\ 2\ \varepsilon_{xz} \\ 2\ \varepsilon_{yz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix}$$

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

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{(1-\mu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{(1-\mu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{(1-\mu)} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{pmatrix}$$

Relaciones para materiales Isótropos

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\,\varepsilon_{xy} \\ 2\,\varepsilon_{xz} \\ 2\,\varepsilon_{yz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix}$$

Como normal y tangencial
está desacoplado

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} \\ -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{2G} \qquad \varepsilon_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{2G} \qquad \varepsilon_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{2G}$$

Si lo quieren escribir como
sistema de ecuaciones:

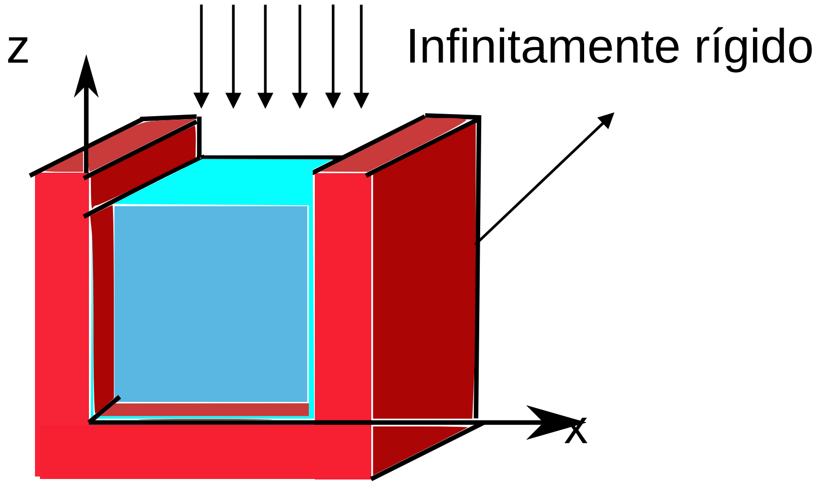
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\sigma_x - \frac{\mu}{E}\sigma_y - \frac{\mu}{E}\sigma_z$$

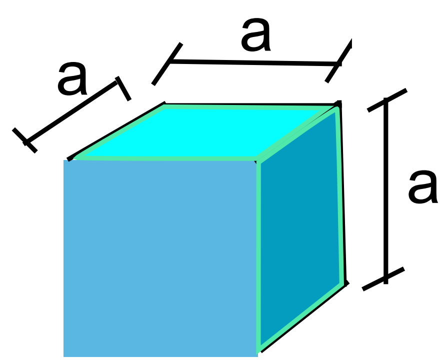
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\sigma_y - \frac{\mu}{E}\sigma_x - \frac{\mu}{E}\sigma_z$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\sigma_z - \frac{\mu}{E}\sigma_y - \frac{\mu}{E}\sigma_x$$

Estas relaciones son validas para cualquier sistema de coordenadas.
Por lo tanto en coordenadas principales es lo mismo

Ejercicio 1: Calcular tensiones, fuerzas, Lfinal, ΔL, Volumen y ΔVolumen



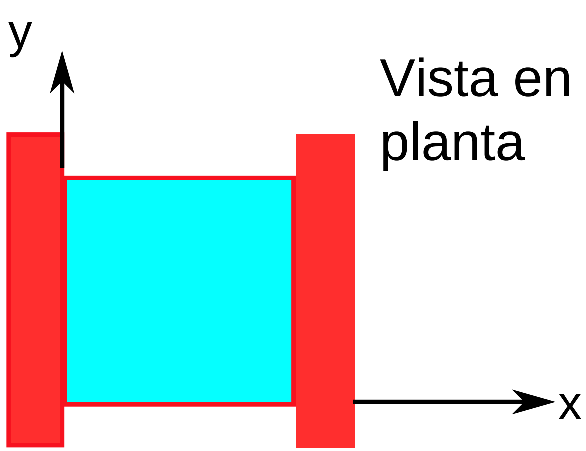


Datos:

$a = 8cm \quad \mu = 0{,}3$

$Pz = 0{,}4\ kN/cm^2$

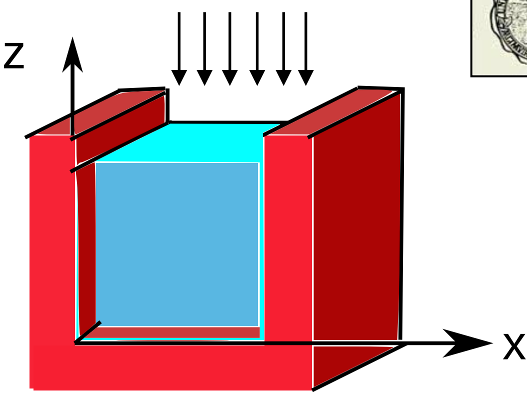
$E = 21000\ kN/cm^2$



<u>Hipótesis:</u>

- “canaleta roja” es infinitamente rígida
- Rozamiento nulo
- Peso del cubo despreciable

¿Qué cosas conocemos?

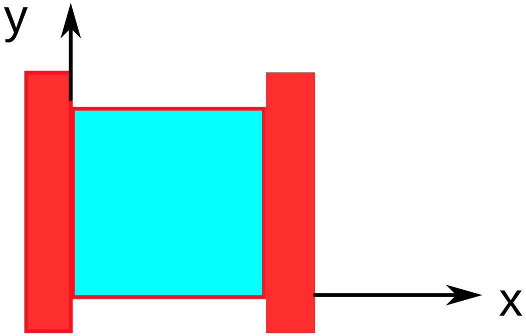


$\sigma_x = \quad ?-$ $\qquad\qquad$ $\varepsilon_{xx} = \quad 0$

$\sigma_y = \quad 0$ $\qquad\qquad$ $\varepsilon_{yy} = \quad ?+$

$\sigma_z = \quad -Pz$ $\qquad\qquad$ $\varepsilon_{zz} = \quad ?-$

$\tau_{ij} = \quad 0$ $\qquad\qquad$ $\gamma_{ij} = \quad 0$



Tenemos por lo tanto 3 incógnitas

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \cancel{\mu\frac{\sigma_y}{E}} - \mu\frac{\sigma_z}{E} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \sigma_x = -\mu \cdot Pz = -0{,}12\,\frac{kN}{cm^2}$$

$$\varepsilon_y = -\mu\frac{\sigma_x}{E} + \cancel{\frac{\sigma_y}{E}} - \mu\frac{\sigma_z}{E} \quad \Longrightarrow \quad \varepsilon_y = +7{,}42 \cdot 10^{-6}$$

$$\varepsilon_z = -\mu\frac{\sigma_x}{E} - \cancel{\mu\frac{\sigma_y}{E}} + \frac{\sigma_z}{E} \quad \Longrightarrow \quad \varepsilon_z = -1{,}73 \cdot 10^{-5}$$

1. Tensiones y Fuerzas

$$\sigma_x = -0{,}12\,\frac{kN}{cm^2} \qquad \sigma_y = 0\,\frac{kN}{cm^2} \qquad \sigma_z = -Pz = -0{,}4\,\frac{kN}{cm^2}$$

$$F_x = -0{,}12\,\frac{kN}{cm^2}\cdot \mathrm{A} \qquad F_y = 0\,\frac{kN}{cm^2}\cdot \mathrm{A} = 0\mathrm{kN} \qquad F_z = -0{,}4\,\frac{kN}{cm^2}\cdot \mathrm{A}$$

¿Qué valor de área tomamos?

Suponiendo pequeñas deformaciones → Tomo el área inicial $A = a^2 = 64\ cm^2$

$$F_x = -7{,}68\ kN \qquad F_y = 0\ kN \qquad F_z = -25{,}6\ kN$$

2. L_{final} y ΔL

$$\varepsilon_x = \frac{Xf - Xi}{Xi} = \frac{\Delta X}{Xi} = 0 \Longrightarrow Xf = Xi = a = 8cm \qquad Xf = 8\ cm$$

$$\varepsilon_y = \frac{Yf - Yi}{Yi} = \frac{\Delta Y}{Yi} = \frac{\Delta Y}{8cm} = 7{,}43 \cdot 10^{-6} \Longrightarrow Yf = 8cm + 7{,}43 \cdot 10^{-6} \cdot 8cm$$

$$Yf = 8{,}00006\ cm$$

$$\varepsilon_z = \frac{Zf - Zi}{Zi} = \frac{\Delta Z}{Zi} = \frac{\Delta Z}{8cm} = -1{,}73 \cdot 10^{-5} \Longrightarrow Zf = 8cm - 1{,}73 \cdot 10^{-5} \cdot 8cm$$

$$Zf = 7{,}99986\ cm$$

¡Muy pequeñas deformaciones!

3. Volumen final y ΔVol

$$\text{Vol i} = 512\ cm^3 \qquad \text{Vol}\ f = Xf \cdot Yf \cdot Zf$$

$$\text{Vol}\ f = Xi(1+\varepsilon_x) \cdot Yi \cdot \left(1+\varepsilon_y\right) \cdot Zi \cdot (1+\varepsilon_z) =$$

$$\text{Vol}\ f = Vol\ i \cdot (1+\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z+\underbrace{\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y+\varepsilon_y \cdot \varepsilon_z+\varepsilon_z \cdot \varepsilon_x+\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y \cdot \varepsilon_z}_{\text{despreciable}}) =$$

$$\varepsilon_{Vol} = \frac{Vol\ f - Vol\ i}{Vol\ i} = \frac{\Delta Vol}{Vol\ i} = \frac{\Delta Vol}{(512cm)^3} = Traza = \varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z = -9{,}87 \cdot 10^{-6}$$

$\longrightarrow$ Invariante 1

$$\text{Vol}\ f = Vol\ i + \Delta Vol = 512\text{cm}^3 \cdot (1+\varepsilon_{Vol}) = 512\text{cm}^3 \cdot (1+(-9{,}87 \cdot 10^{-6}))$$

$$\text{Vol}\ f = 511{,}995\ \text{cm}^3 \qquad \Delta Vol = -5{,}05344 \cdot 10^{-3} cm^3$$