

05. Ecuaciones diferenciales fundamentales de la teoría de la elasticidad

secciones 5.1 a 5.2

Michael Heredia Pérez
mherediap@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
Departamento de Ingeniería Civil
Mecánica de Sólidos

2023a





Advertencia

Estas diapositivas son solo una herramienta didáctica para guiar la clase, por si solas no deben tomarse como material de estudio y el estudiante debe dirigirse a la literatura recomendada (Álvarez, 2022).





Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Introducción

Problema

Dado un cuerpo sólido elástico Ω , se desea conocer su estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en cada punto $(x, y, z) \in \Omega$, así como las reacciones en sus apoyos.

Del problema conocemos:

- La geometría del cuerpo
- Tipo y ubicación de los apoyos.
- Propiedades elásticas del material
- Cargas que actúan sobre el sólido ($b(x)$ y $f(x)$)



Introducción

Problema

Dado un cuerpo sólido elástico Ω , se desea conocer su estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en cada punto $(x, y, z) \in \Omega$, así como las reacciones en sus apoyos.

Del problema conocemos:

- La geometría del cuerpo
- Tipo y ubicación de los apoyos.
- Propiedades elásticas del material
- Cargas que actúan sobre el sólido ($b(x)$ y $f(x)$)



Introducción

Problema

Dado un cuerpo sólido elástico Ω , se desea conocer su estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en cada punto $(x, y, z) \in \Omega$, así como las reacciones en sus apoyos.

Del problema conocemos:

- La geometría del cuerpo
- Tipo y ubicación de los apoyos.
- Propiedades elásticas del material
- Cargas que actúan sobre el sólido ($b(x)$ y $f(x)$)



Introducción

Problema

Dado un cuerpo sólido elástico Ω , se desea conocer su estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en cada punto $(x, y, z) \in \Omega$, así como las reacciones en sus apoyos.

Del problema conocemos:

- La geometría del cuerpo
- Tipo y ubicación de los apoyos.
- Propiedades elásticas del material
- Cargas que actúan sobre el sólido ($b(x)$ y $f(x)$)



Introducción

Problema

Dado un cuerpo sólido elástico Ω , se desea conocer su estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en cada punto $(x, y, z) \in \Omega$, así como las reacciones en sus apoyos.

Del problema conocemos:

- La geometría del cuerpo
- Tipo y ubicación de los apoyos.
- Propiedades elásticas del material
- Cargas que actúan sobre el sólido ($\mathbf{b}(\mathbf{x})$ y $\mathbf{f}(\mathbf{x})$)



Ecuaciones de la mecánica del medio continuo

La variación de los esfuerzos dentro del sólido estará definida por:

- **EDPs de equilibrio:** describen leyes físicas universales como conservación de la masa y de la energía. Aplicables a todo material.
- **EDPs de compatibilidad:** Describen el comportamiento mecánico de materiales particulares.



Ecuaciones de la mecánica del medio continuo

La variación de los esfuerzos dentro del sólido estará definida por:

- **EDPs de equilibrio:** describen leyes físicas universales como conservación de la masa y de la energía. Aplicables a todo material.
- **EDPs de compatibilidad:** Describen el comportamiento mecánico de materiales particulares.



Ecuaciones de la mecánica del medio continuo

La variación de los esfuerzos dentro del sólido estará definida por:

- **EDPs de equilibrio:** describen leyes físicas universales como conservación de la masa y de la energía. Aplicables a todo material.
- **EDPs de compatibilidad:** Describen el comportamiento mecánico de materiales particulares.



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

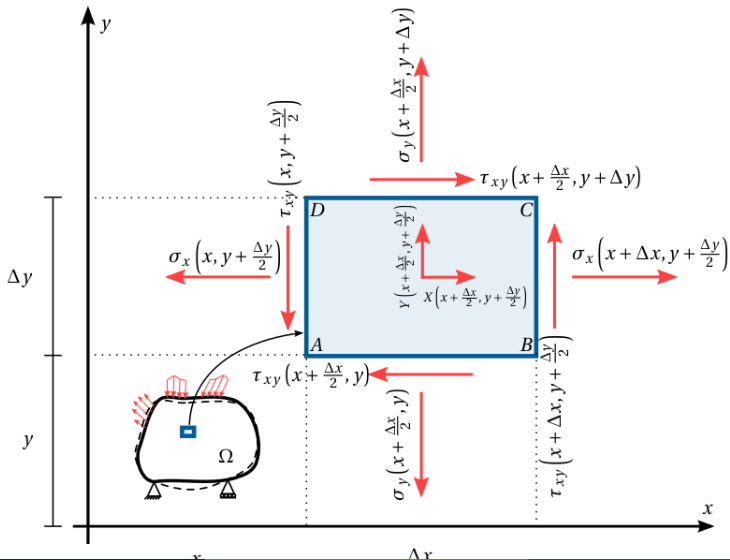
5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ecuaciones diferenciales de equilibrio





Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Para el caso bidimensional, encontramos el equilibrio mediante el siguiente par de ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}(x, y)}{\partial y} + X(x, y) &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y(x, y)}{\partial y} + Y(x, y) &= 0\end{aligned}$$



Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Análogamente, en el caso tridimensional:

$$\frac{\partial \sigma_x(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}(x, y, z)}{\partial z} + X(x, y, z) = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}(x, y, z)}{\partial z} + Y(x, y, z) = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z(x, y, z)}{\partial z} + Z(x, y, z) = 0$$



Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Ecuaciones diferenciales parciales de equilibrio (interno)

$$\frac{\partial \sigma_x(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}(x, y, z)}{\partial z} + X(x, y, z) = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}(x, y, z)}{\partial z} + Y(x, y, z) = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z(x, y, z)}{\partial z} + Z(x, y, z) = 0$$

Expresan el equilibrio de fuerzas en las direcciones x , y y z en todos los puntos interiores del sólido.

- Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) en 1829, matemático e ingeniero civil.



Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Cuando la única fuerza másica actuando es el peso propio:

$$\frac{\partial \sigma_x(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}(x, y, z)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}(x, y, z)}{\partial z} - \rho(x, y, z)g = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z(x, y, z)}{\partial z} = 0$$



Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0$$

- En notación vectorial:

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{b}} = 0$$

$$\text{div } \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{b}} = 0$$

Interpretación física

- Aplicables a cualquier sólido independiente del material constitutivo.
- Los esfuerzos son funciones derivables y continuas con respecto a la posición.
- El problema planteado es estáticamente indeterminado (o hiperestático)



Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0$$

- En notación vectorial:

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{b}} = 0$$

$$\text{div } \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{b}} = 0$$

Interpretación física

- Aplicables a cualquier sólido independiente del material constitutivo.
- Los esfuerzos son funciones derivables y continuas con respecto a la posición.
- El problema planteado es estáticamente indeterminado (o hiperestático)



Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0$$

- En notación vectorial:

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

$$\operatorname{div} \underline{\underline{\sigma}} + \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

Interpretación física

- Aplicables a cualquier sólido independiente del material constitutivo.
- Los esfuerzos son funciones derivables y continuas con respecto a la posición.
- El problema planteado es estáticamente indeterminado (o hiperestático)



Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0$$

- En notación vectorial:

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

$$\operatorname{div} \underline{\underline{\sigma}} + \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

Interpretación física

- Aplicables a cualquier sólido independiente del material constitutivo.
- Los esfuerzos son funciones derivables y continuas con respecto a la posición.
- El problema planteado es estáticamente indeterminado (o hiperestático)



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

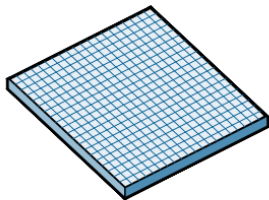
5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias

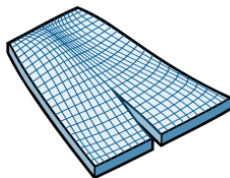


¿Para qué?



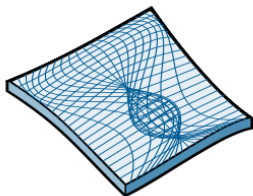
original

(a)

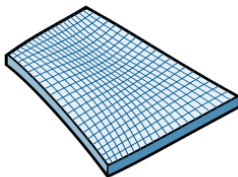


deformación no compatible: grietas

(b)



deformación no compatible: traslapos



deformación compatible



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Operando:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2}\end{aligned}$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}$$



Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Operando:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2}\end{aligned}$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}$$



Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Operando:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2}$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}$$



Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Operando:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2}$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}$$



Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Operando:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2}\end{aligned}$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}$$



Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Ecuación de compatibilidad bidimensional en términos de deformaciones

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}$$

- Los desplazamientos u y v deben ser funciones continuas y derivables, cuyas primeras dos derivadas parciales mixtas son continuas.
- Únicamente aplicable cuando se presentan deformaciones pequeñas.



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Conociendo:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

Sumando estas ecuaciones y organizando términos:

$$2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right)$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Conociendo:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \rightarrow \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

Sumando estas ecuaciones y organizando términos:

$$2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right)$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Intercambiando cíclicamente los índices x , y , y z , obtenemos:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right)
 \end{aligned}$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Ecuaciones de compatibilidad de Saint-Venant

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right)
 \end{aligned}$$

(mismas anotaciones)

- Adhémar Jean Claude de Saint-Venant (1797-1886) en 1864, matemático e ingeniero mecánico.



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Las ecuaciones de Saint-Venant se pueden resumir en una única ecuación usando notación tensorial:

$$\varepsilon_{ij,km} + \varepsilon_{mk,ji} - \varepsilon_{ik,jm} - \varepsilon_{mj,ki} = 0; \quad i, j, k, m = 1, 2, 3$$

Esta única ecuación representa 81 ecuaciones diferenciales parciales, no obstante, debido a la simetría del tensor de deformaciones ε_{ij} , solo las seis ecuaciones anteriores son distintas.



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

Las ecuaciones anteriores son LD. Se pueden reducir al siguiente sistema de 3 EDPs LI. (Ameen, 2005):

$$\begin{aligned} 2 \frac{\partial^4 \varepsilon_x}{\partial y^2 \partial z^2} &= \frac{\partial^3}{\partial x \partial y \partial z} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^4 \varepsilon_y}{\partial x^2 \partial z^2} &= \frac{\partial^3}{\partial x \partial y \partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^4 \varepsilon_z}{\partial x^2 \partial y^2} &= \frac{\partial^3}{\partial x \partial y \partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Sin embargo, se emplea la formulación anterior (sistema 6x6) al ser matemáticamente más simple su uso.



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

Condición de **tensión plana**: $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. Las deformaciones (eq. 4.35):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}$$

Derivando:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{1}{E} \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{1}{E} \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{G} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y}$$

Sustituyendo en la ecuación de compatibilidad en dos dimensiones (5.6)

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{2(1 + \nu)} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \right) \quad (1)$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

Condición de **tensión plana**: $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. Las deformaciones (eq. 4.35):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}$$

Derivando:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{1}{E} \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{1}{E} \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{G} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y}$$

Sustituyendo en la ecuación de compatibilidad en dos dimensiones (5.6)

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{2(1 + \nu)} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \right) \quad (1)$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

Condición de **tensión plana**: $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. Las deformaciones (eq. 4.35):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}$$

Derivando:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} = \frac{1}{E} \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{1}{E} \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{G} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y}$$

Sustituyendo en la ecuación de compatibilidad en dos dimensiones (5.6)

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{2(1 + \nu)} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \right) \quad (1)$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

Las ecuaciones diferenciales de equilibrio 2D:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0 \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0$$

Derivando, sumando y despejando el término que contiene a τ_{xy} :

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right) \quad (2)$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

Las ecuaciones diferenciales de equilibrio 2D:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0 \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0$$

Derivando, sumando y despejando el término que contiene a τ_{xy} :

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right) \quad (2)$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

Igualando (1) y (2), simplificando:

Ecuación de compatibilidad para el caso de tensión plana

En términos de esfuerzos:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = -(1 + \nu) \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right)$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

Igualando (1) y (2), simplificando:

Ecuación de compatibilidad para el caso de tensión plana

En términos de esfuerzos:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = -(1 + \nu) \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right)$$



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresada en términos de esfuerzos

Condición de **deformación plana**: $\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$. Las deformaciones (4.38):

$$\varepsilon_x = \frac{1 + \nu}{E}((1 - \nu)\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \varepsilon_y = \frac{1 + \nu}{E}((1 - \nu)\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}$$

Aplicando derivadas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} &= \frac{1 + \nu}{E} \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\sigma_x(1 - \nu) - \nu\sigma_y) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{1 + \nu}{E} \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\sigma_y(1 - \nu) - \nu\sigma_x) \\ \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} &= \frac{1}{G} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} \end{aligned}$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresada en términos de esfuerzos

Condición de **deformación plana**: $\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$. Las deformaciones (4.38):

$$\varepsilon_x = \frac{1 + \nu}{E}((1 - \nu)\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad \varepsilon_y = \frac{1 + \nu}{E}((1 - \nu)\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}$$

Aplicando derivadas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} &= \frac{1 + \nu}{E} \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\sigma_x(1 - \nu) - \nu\sigma_y) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{1 + \nu}{E} \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\sigma_y(1 - \nu) - \nu\sigma_x) \\ \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} &= \frac{1}{G} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} \end{aligned}$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresada en términos de esfuerzos

Sustituyendo en la ecuación de compatibilidad en dos dimensiones (5.6):

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{G(1 + \nu)}{E} \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} (\sigma_x(1 - \nu) - \nu \sigma_y) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\sigma_y(1 - \nu) - \nu \sigma_x) \right) \quad (3)$$

Igualando las ecuaciones (2) y (3)

$$\begin{aligned} \frac{G(1 + \nu)}{E} \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} (\sigma_x(1 - \nu) - \nu \sigma_y) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\sigma_y(1 - \nu) - \nu \sigma_x) \right) = \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right) \end{aligned}$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresada en términos de esfuerzos

Simplificando:

Ecuación de compatibilidad para el caso de deformación plana

En términos de esfuerzos:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{1}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right)$$



Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresada en términos de esfuerzos

Simplificando:

Ecuación de compatibilidad para el caso de deformación plana

En términos de esfuerzos:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{1}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right)$$



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresada en términos de esfuerzos

Ecuación de compatibilidad general para el caso bidimensional

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = K_1 \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right)$$

$$K_1 = \begin{cases} -(1 + \nu) & \text{para el caso de **tensión plana**} \\ -\frac{1}{1 - \nu} & \text{para el caso de **deformación plana**} \end{cases}$$

- Aplicable solo a sólidos con materiales elásticos (Ley de Hooke), lineales e isótropos.
- Materiales homogéneos: $E(x, y, z) = \nu(x, y, z) = \text{cte.}$
- Deformaciones pequeñas.



Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresada en términos de esfuerzos

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\nabla^2 \sigma_{ii} = K_1 b_{i,i}$$

- En notación vectorial:

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) = K_1 \operatorname{div} \mathbf{b}$$

donde

$$\begin{cases} \nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \text{operador laplaciano bidimensional} \\ \operatorname{div} \mathbf{b} := \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} & \text{divergencia del campo vectorial } \mathbf{b} \end{cases}$$



Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresada en términos de esfuerzos

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\nabla^2 \sigma_{ii} = K_1 b_{i,i}$$

- En notación vectorial:

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) = K_1 \operatorname{div} \mathbf{b}$$

donde

$$\begin{cases} \nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \text{operador laplaciano bidimensional} \\ \operatorname{div} \mathbf{b} := \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} & \text{divergencia del campo vectorial } \mathbf{b} \end{cases}$$



Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresada en términos de esfuerzos

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\nabla^2 \sigma_{ii} = K_1 b_{i,i}$$

- En notación vectorial:

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) = K_1 \operatorname{div} \mathbf{b}$$

donde

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \text{operador laplaciano bidimensional} \\ \operatorname{div} \mathbf{b} := \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} & \text{divergencia del campo vectorial } \mathbf{b} \end{array} \right.$$



Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresada en términos de esfuerzos

Dos notaciones:

- En notación tensorial:

$$\nabla^2 \sigma_{ii} = K_1 b_{i,i}$$

- En notación vectorial:

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) = K_1 \operatorname{div} \mathbf{b}$$

donde

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \text{operador laplaciano bidimensional} \\ \operatorname{div} \mathbf{b} := \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} & \text{divergencia del campo vectorial } \mathbf{b} \end{array} \right.$$



Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresada en términos de esfuerzos

¿Y si las fuerzas másicas son homogéneas?

$$\frac{\partial X}{\partial x} = \frac{\partial Y}{\partial y} = 0;$$



Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresada en términos de esfuerzos

Ecuación de Lévy

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = 0$$

La distribución de esfuerzos debe ser igual para todas las estructuras en tensión o deformación plana, siempre y cuando se trate de:

- Contornos idénticos.
 - Estructuras sometidas al mismo sistema de fuerzas superficiales y másicas, constantes.
-
- Maurice Lévy (1838-1910), ingeniero y matemático francés



Fotoelasticidad

En el método fotoelástico, un material transparente se somete a una luz polarizada y a unas fuerzas; según la llamada *ley de Brewster* o *ley tenso-óptica*, el material responderá mostrando unas franjas del igual color, las cuales se pueden interpretar como curvas de esfuerzo cortante máximo τ_{max} constante; esto siempre y cuando el esfuerzo fuera del plano sea el esfuerzo intermedio, es decir, σ_2 en el caso tridimensional. ([ver video](#)).

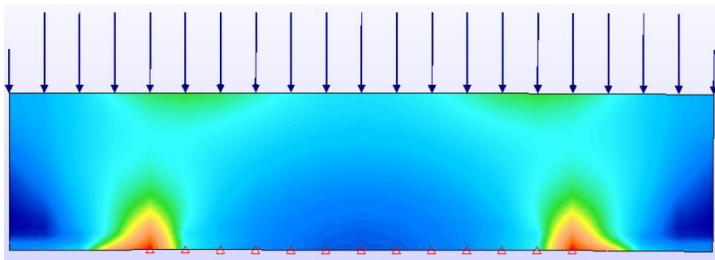


Figura: Estudio de la distribución de esfuerzos sobre un polímero sometido a compresión, utilizando la técnica de fotoelasticidad. Hilda Sofía Soto Lesmes, [ver](#).



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

Recordemos:

- Las ecuaciones (4.3) dadas por la superposición de las deformaciones elásticas:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$

- Las EDPs de equilibrio interno (5.2):

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{b}} = 0$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

Recordemos:

- Las ecuaciones (4.3) dadas por la superposición de las deformaciones elásticas:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$

- Las EDPs de equilibrio interno (5.2):

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{b}} = 0$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

Recordemos:

- Las ecuaciones (4.3) dadas por la superposición de las deformaciones elásticas:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$

- Las EDPs de equilibrio interno (5.2):

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{b}} = 0$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

$$\nabla^2 \sigma_x + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = -\frac{\nu}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) - 2 \frac{\partial X}{\partial x}$$

$$\nabla^2 \sigma_y + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = -\frac{\nu}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) - 2 \frac{\partial Y}{\partial y}$$

$$\nabla^2 \sigma_z + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} = -\frac{\nu}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) - 2 \frac{\partial Z}{\partial z}$$

$$\nabla^2 \tau_{yz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y \partial z} = - \left(\frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\partial Z}{\partial y} \right)$$

$$\nabla^2 \tau_{xz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial z} = - \left(\frac{\partial X}{\partial z} + \frac{\partial Z}{\partial x} \right)$$

$$\nabla^2 \tau_{xy} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial y} = - \left(\frac{\partial X}{\partial y} + \frac{\partial Y}{\partial x} \right)$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

Ecuaciones de Michell

$$\nabla^2 \sigma_x + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = -\frac{\nu}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) - 2 \frac{\partial X}{\partial x}$$

$$\nabla^2 \sigma_y + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = -\frac{\nu}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) - 2 \frac{\partial Y}{\partial y}$$

$$\nabla^2 \sigma_z + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} = -\frac{\nu}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) - 2 \frac{\partial Z}{\partial z}$$

$$\nabla^2 \tau_{yz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y \partial z} = - \left(\frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\partial Z}{\partial y} \right)$$

$$\nabla^2 \tau_{xz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial z} = - \left(\frac{\partial X}{\partial z} + \frac{\partial Z}{\partial x} \right)$$

$$\nabla^2 \tau_{xy} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial y} = - \left(\frac{\partial X}{\partial y} + \frac{\partial Y}{\partial x} \right)$$

- John Henry Michell (1863-1940) en 1900, matemático australiano.



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu} \Theta_{,ij} = -\frac{\nu}{1-\nu} \delta_{ij} b_{k,k} - b_{i,j} - b_{j,i}$$

donde:

- $\Theta := \sigma_{kk} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ es el primer invariante de esfuerzos I_1
- ∇^2 es el **operador laplaciano tridimensional**:

$$\nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Comentario

A comparación de las ecuaciones de Saint-Venant (5.7) las de Michell son LI



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu}\Theta_{,ij} = -\frac{\nu}{1-\nu}\delta_{ij}b_{k,k} - b_{i,j} - b_{j,i}$$

donde:

- $\Theta := \sigma_{kk} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ es el primer invariante de esfuerzos I_1
- ∇^2 es el **operador laplaciano tridimensional**:

$$\nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Comentario

A comparación de las ecuaciones de Saint-Venant (5.7) las de Michell son LI



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu}\Theta_{,ij} = -\frac{\nu}{1-\nu}\delta_{ij}b_{k,k} - b_{i,j} - b_{j,i}$$

donde:

- $\Theta := \sigma_{kk} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ es el primer invariante de esfuerzos I_1
- ∇^2 es el **operador laplaciano tridimensional**:

$$\nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Comentario

A comparación de las ecuaciones de Saint-Venant (5.7) las de Michell son LI



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

En notación tensorial:

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu}\Theta_{,ij} = -\frac{\nu}{1-\nu}\delta_{ij}b_{k,k} - b_{i,j} - b_{j,i}$$

donde:

- $\Theta := \sigma_{kk} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ es el primer invariante de esfuerzos I_1
- ∇^2 es el **operador laplaciano tridimensional**:

$$\nabla^2 := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Comentario

A comparación de las ecuaciones de Saint-Venant (5.7) las de Michell son LI



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

¿Y si las fuerzas másicas son constantes?

$$\mathbf{b}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} X(x, y, z) \\ Y(x, y, z) \\ Z(x, y, z) \end{bmatrix} = \text{cte};$$



Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

Ecuaciones de Beltrami

$$\nabla^2 \sigma_x + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = 0$$

$$\nabla^2 \tau_{yz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y \partial z} = 0$$

$$\nabla^2 \sigma_y + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0$$

$$\nabla^2 \tau_{xz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial z} = 0$$

$$\nabla^2 \sigma_z + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} = 0$$

$$\nabla^2 \tau_{xy} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial y} = 0$$

- Válidas para materiales elásticos, lineales, homogéneos e isótropos (Ley de Hooke).
- Son análogas a $\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) = 0$ (caso bidimensional).

- Eugenio Beltrami (1835-1900) en 1892. matemático italiano.



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

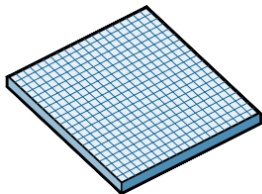
5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias

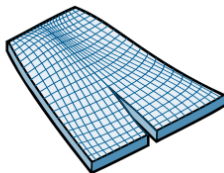


Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad



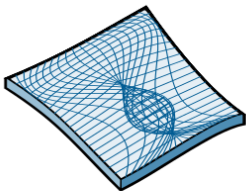
original

(a)



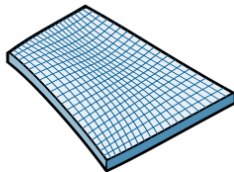
deformación no compatible: grietas

(b)



deformación no compatible: traslajos

(c)



deformación compatible

(d)



Sobre las ecuaciones de compatibilidad en términos de deformaciones (5.6) y (5.7)

interpretación

No deben aparecer grietas (discontinuidades) en el campo de deformaciones.

Razones:

- u , v , w son:
 - Funciones continuas y derivables.
 - Continuidad $C^3(\Omega)$
- Válidas para materiales con cualquier tipo de comportamiento (elástico, plástico, anisótropo, lineal, no lineal, etc) siempre y cuando las deformaciones de este sean pequeñas.



Sobre las ecuaciones de compatibilidad en términos de deformaciones (5.6) y (5.7)

interpretación

No deben aparecer grietas (discontinuidades) en el campo de deformaciones.

Razones:

- u, v, w son:
 - Funciones continuas y derivables.
 - Continuidad $C^3(\Omega)$
- Válidas para materiales con cualquier tipo de comportamiento (elástico, plástico, anisótropo, lineal, no lineal, etc) siempre y cuando las deformaciones de este sean pequeñas.



Sobre las ecuaciones de compatibilidad en términos de deformaciones (5.6) y (5.7)

interpretación

No deben aparecer grietas (discontinuidades) en el campo de deformaciones.

Razones:

- u, v, w son:
 - Funciones continuas y derivables.
 - Continuidad $C^3(\Omega)$
- Válidas para materiales con cualquier tipo de comportamiento (elástico, plástico, anisótropo, lineal, no lineal, etc) siempre y cuando las deformaciones de este sean pequeñas.



Sobre las ecuaciones de compatibilidad en términos de esfuerzos (5.13) (5.18) (5.17) y (5.19)

interpretación

Sólo son válidas para materiales con comportamiento elástico, lineal, homogéneo e isótropo siempre y cuando las deformaciones sean pequeñas.

Razón:

- En su deducción se empleó la Ley de Hooke.



Sobre las ecuaciones de compatibilidad en términos de esfuerzos (5.13) (5.18) (5.17) y (5.19)

interpretación

Sólo son válidas para materiales con comportamiento elástico, lineal, homogéneo e isótropo siempre y cuando las deformaciones sean pequeñas.

Razón:

- En su deducción se empleó la Ley de Hooke.



En general: los traslapos

interpretación

- El hecho de que el sólido no se traslapará en sus deformaciones está implícitamente dicho por las ecuaciones de compatibilidad al imponer las relaciones entre las segundas derivadas de los desplazamientos u , v y w .
- El propósito principal de las ecuaciones de compatibilidad es imponer restricciones en las deformaciones, garantizando así que los desplazamientos u , v y w tengan un valor único.



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Ejercicio

Ejemplo

Considere una condición de tensión plana, en la cual $\varepsilon_x(x, y) = a(x^2 + y^2)$ y $\gamma_{x,y}(x, y) = 2xy$, donde a es una constante. Encuentre la deformación longitudinal $\varepsilon_y(x, y)$ correspondiente que sea físicamente válida, asumiendo una condición en la cual las fuerzas másicas se consideran nulas y que el material es elástico, lineal, homogéneo e isótropo.

Código

- [05_02_07_ejemplo.py](#)



Derrotero

1 Introducción

2 5.1. Ecuaciones diferenciales de equilibrio

3 5.2. Ecuaciones de compatibilidad

5.2.1. Ecuaciones de compatibilidad en dos dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.2. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de deformaciones

5.2.3. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de tensión plana expresada en términos de esfuerzos

5.2.4. Ecuaciones de compatibilidad para el caso de deformación plana expresadas en términos de esfuerzos

5.2.5. Ecuaciones de compatibilidad general para el caso bidimensional expresadas en términos de esfuerzos

5.2.6. Ecuaciones de compatibilidad en tres dimensiones expresadas en términos de esfuerzos

5.2.7. Interpretación física de las ecuaciones de compatibilidad

5.2.8. Ejercicio

4 Referencias



Referencias

- Ameen, M. (2005). *Computational Elasticity: Theory of Elasticity and Finite and Boundary Element Methods*. Alpha Science International.
- Álvarez, D. A. (2022). *Teoría de la elasticidad*, volume 1. Universidad Nacional de Colombia.



Links

05 - Ecuaciones diferenciales fundamentales de la teoría de la ...

Problema fundamental del análisis estructural

Dado un cuerpo sólido elástico Ω , se desea conocer su estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en cada punto $(x, y, z) \in \Omega$, así como las reacciones en los apoyos.

05 - Ecuaciones diferenciales fundamentales de la teoría de la ...

diegoandresvalenz

4 videos · 306 visualizaciones · Actualizado por última vez...

Reproducir t...

Para poder calcular el estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos de un cuerpo elástico, se requiere saber cómo varían los esfuerzos dentro del cuerpo; este comportamiento está descrito por las ecuaciones diferenciales parciales que veremos en esta lista de reproducción. Dichas ecuaciones son las que resuelven los sofisticados paquetes de análisis estructural como ANSYS, COMSOL, o ABAQUS cuando se hace un estudio de los esfuerzos y deformaciones y desplazamientos del sólido.

05.00 - El problema fundamental de la teoría de la elasticidad

diegoandresvalenz · 719 visualizaciones · hace 2 años

05.01 - Deducción e interpretación de las ecuaciones diferenciales de equilibrio interno

diegoandresvalenz · 1718 visualizaciones · hace 2 años

05.02 - Ecuaciones diferenciales de compatibilidad en términos de deformaciones

diegoandresvalenz · 1735 visualizaciones · hace 2 años

05.02 - Ecuaciones diferenciales de compatibilidad en términos de esfuerzos en 2D

diegoandresvalenz · 661 visualizaciones · hace 2 años

- Lista de reproducción: [05 - Ecuaciones diferenciales fundamentales de la teoría de la ...](#)
- Repositorio del curso: [github/medio_continuo](https://github.com/medio_continuo)