



ESTRUCTURAS II: SOLICITACIONES - RIGIDEZ

Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño

Esfuerzos internos, tensión y deformación - rigidez

Ing. Civil Daniel Videla - 2026

 por Daniel Videla

Equilibrio, Resistencia y Rigidez

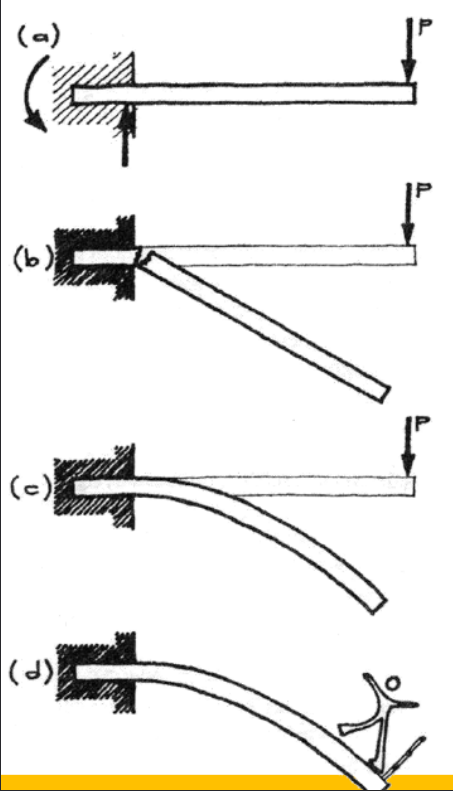
- 1

Equilibrio
Fuerzas exteriores (Estática)
- 2

Resistencia
Evitar rotura y colapso
- 3

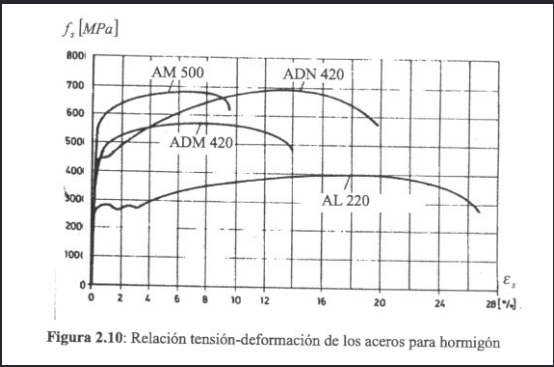
Rigidez
Deformaciones menores a las admisibles

No basta con posibilitar el **equilibrio**.
Hay que impedir que la estructura se **rompa** (b) o se **deforme** (c) excesivamente.



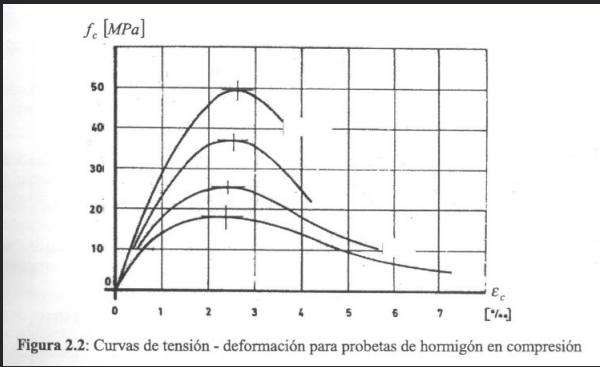
[3] "Intuición y razonamiento en el diseño estructural"
D. Moisset de Espanés

Materiales Estructurales



Material DÚCTIL

- Acero
- Deformación plástica antes de rotura
- Aviso previo al colapso



Material FRÁGIL

- Hormigón
- Rotura sin deformación significativa
- Falla súbita sin aviso

Características Geométricas de la Sección



Forma Estructural

Relación directa con función y sollicitación



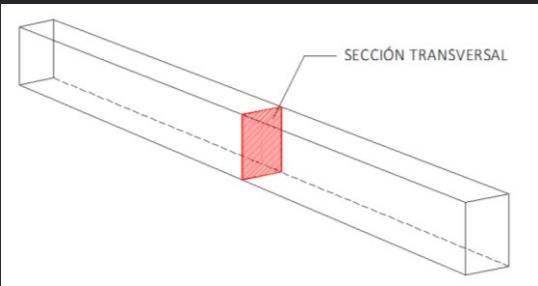
Capacidad Resistente

Según característica geométrica y sollicitación



Sección Transversal

Figura plana con propiedades específicas



Área y Momento Estático

Área o Superficie [A]

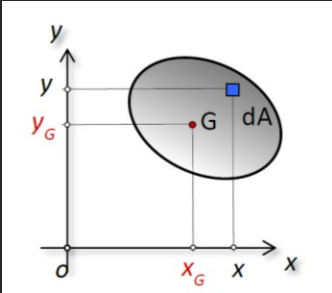
Según forma geométrica
Medida en cm²

Momento Estático [cm³]

Producto de superficie
por distancia a un eje
 $S_x = A \cdot y_g$; $S_y = A \cdot x_g$

Baricentro

Punto donde se concentra toda la superficie
 $Y_g = S_x / A$; $X_g = S_y / A$



$$dS_x = y \cdot dA$$

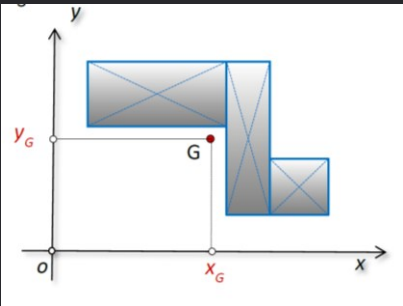
$$dS_y = x \cdot dA$$

$$S_x = \int y \cdot dA$$

$$S_y = \int x \cdot dA$$

DEI Guía de Estudio 2 – Propiedades de las Secciones – ARQ. – FI - UNCuyo

Centro de Gravedad



$$x_g = \frac{S_y}{A} = \frac{\sum_1^n A_i x_i}{\sum_1^n A_i}$$
$$y_g = \frac{S_x}{A} = \frac{\sum_1^n A_i y_i}{\sum_1^n A_i}$$

DEI Guía de Estudio 2 – Propiedades de las Secciones – ARQ. – FI - UNCuyo

La estabilidad de un cuerpo respecto a su plano de apoyo, queda determinada por la posición o ubicación del centro de gravedad del mismo.



Punto material

Concentra todo el peso del cuerpo



Teorema de Varignón

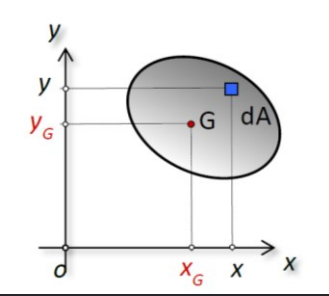
Permite determinar el baricentro



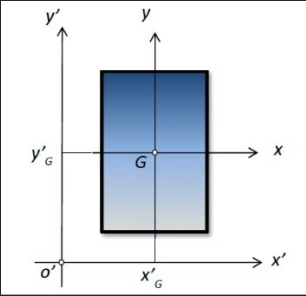
Aplicación estructural

Fundamental para análisis de la estabilidad

Momento de Inercia



$$I_x = \int y^2 \cdot dA$$
$$I_y = \int x^2 \cdot dA$$



$$I_{x'} = I_x + y_G'^2 A$$
$$I_{y'} = I_y + x_G'^2 A$$

Definición
Producto de superficie por distancia al cuadrado a un eje

Capacidad
Resistencia de un cuerpo a girar alrededor de un eje



Teorema de Steiner o Ejes Paralelos
Para secciones compuestas o irregulares

Función
Resistencia a deformaciones por flexión

Módulo Resistente y Radio de Giro

1

Módulo Resistente (Sx)
Relación entre Momento de Inercia y distancia máxima

2

Fórmula
 $S_x = I_x / c_x \text{ [cm}^3\text{]}$

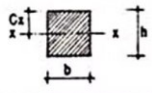
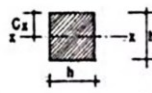
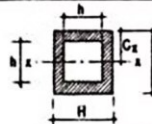
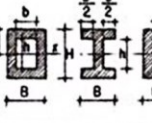
3

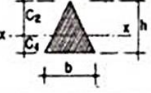
Radio de Giro (rx)
Distribución del área transversal alrededor de un eje

4

Fórmula
 $r_x^2 = I_x / A \text{ [cm]}$

Características Geométricas de la Sección

SECCION	AREA	C _x	I _x	S _x
	bh	$\frac{h}{2}$	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^2}{6}$
	h²	$\frac{h}{2}$	$\frac{h^4}{12}$	$\frac{h^3}{6}$
	h²	$\frac{h}{\sqrt{2}}$	$\frac{h^4}{12}$	$\frac{\sqrt{2}}{12}h^3=0$
	H²-h²	$\frac{H}{2}$	$\frac{H^4-h^4}{12}$	$0,12\frac{H^4}{H}$
	BH-bh	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^3-bh^3}{12}$	$\frac{BH^3-bh^3}{6H}$

Nº	SECCION	AREA	C _x	I _x	S _x
6		$\frac{bh}{2}$	$C_x=\frac{2}{3}h$ $C_y=\frac{1}{2}h$	$\frac{bh^3}{36}$	$W_x=\frac{bh^2}{24}$ $W_y=\frac{bh^2}{12}$
7		$\frac{\pi}{4}D^2$ $0,79D^2$ $3,14R^2$	$\frac{D}{2}=R$	$\frac{\pi D^4}{64}$ $0,05D^4$ $0,79R^4$	$\frac{\pi D^3}{32}$ $0,1D^3$ $0,79R^3$
8		$\pi D t$ $6,28 R t$	$\frac{D}{2}=R$	$\frac{\pi D^3}{8}t$ $0,39D^3t$ $3,14R^3t$	$\frac{\pi D^3}{4}t$ $0,79D^3t$ $3,14R^3t$
9		$\frac{\pi}{2}R^2$ $1,57R^2$	$C_x=0,58R$ $C_y=0,42R$	$0,11R^4$	$W_x=0,19R^3$ $W_y=0,26R^3$
10		$\pi R t$	$C_x=0,36R$ $C_y=0,64R$	$0,30R^4t$	$W_x=0,83R^3t$ $W_y=0,47R^3t$

Características Geométricas de la Sección



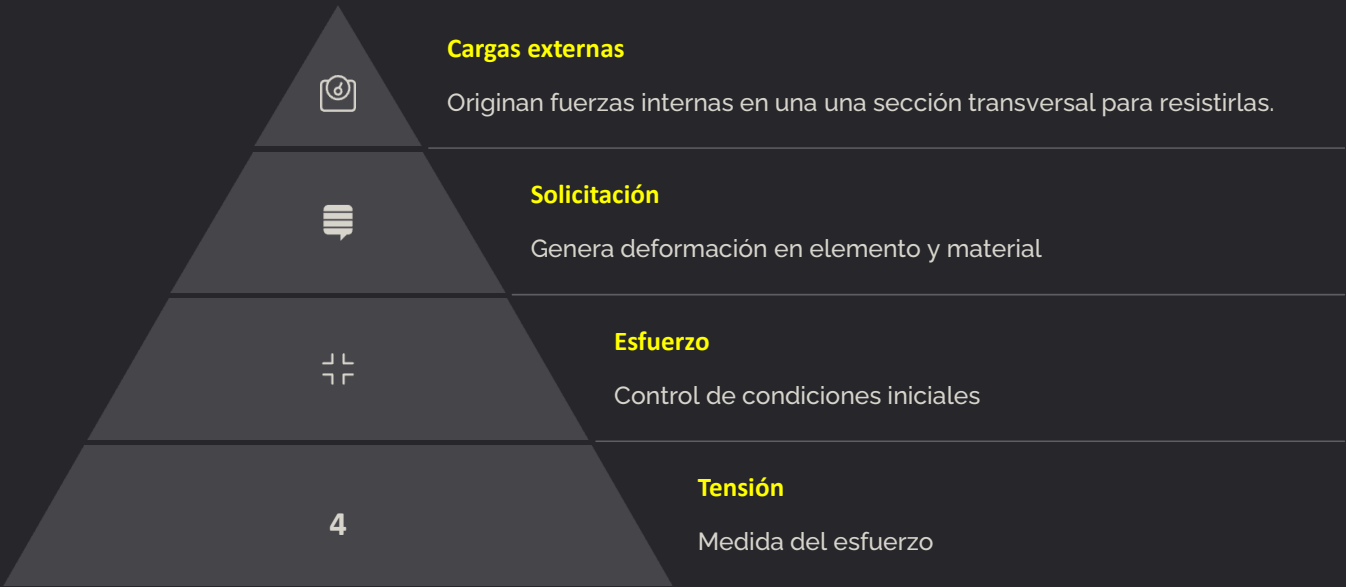
IPN según IRAM-IAS U 500-511

Ag = Área bruta de la sección transversal.
I = Momento de Inercia de la sección. respecto de los ejes principales.
 $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ Radio de giro.
S = Módulo resistente elástico de la sección.
Q = Momento estático de media sección.
Z = Módulo plástico de la sección.

J = Módulo de torsión.
Cw = Módulo de alabeo.
X₁, X₂ = Factores de pandeo.
L_y = Longitud lateralmente no arriostrada límite para desarrollar la capacidad de plastificación total por flexión.
L_r = Longitud lateralmente no arriostrada límite para pandeo lateral torsional inelástico.

Designación	Dimensiones						Relaciones		Ag	Peso	X - X					Y - Y					Agujeros en el Ala		Distancia agujero al borde	Esp.	J	Cw	X ₁	X ₂ (10) ³	Acero F-24					
	d	bf	tf	hw	tw	r ₁	r ₂	bf/2tf			hw/tw	I _x	S _x	r _x	Q _x	Z _x	I _y	S _y	r _y	Q _y	1,5.S _y	Z _y	w ₁	d ₁	w ₄	t _r	Carga Aíma		Carga Ala Sup.					
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm			cm ²	Kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm	cm ³	cm ³	cm ³	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ⁶	MPa	MPa ²	cm	cm	cm	cm	
80	80	42	5,9	59	3,9	2,3		3,56	15,1	7,57	5,94	77,8	19,5	3,20	11,4	22,8	6,29	3,00	0,91	2,46	4,50	4,93	22	6,4	10	4,43	0,71	87,5	32815	0,70	47	260	42	230
100	100	50	6,8	75	4,5	2,7		3,68	16,7	10,6	8,34	171	34,2	4,01	19,9	39,8	12,2	4,88	1,07	4,02	7,32	8,04	28	6,4	11	5,05	1,31	268	30082	1,00	55	283	49	248
120	120	58	7,7	92	5,1	3,1		3,77	18,0	14,2	11,1	328	54,7	4,81	31,8	63,6	21,5	7,41	1,23	6,12	11,12	12,24	32	8,4	13	5,67	2,23	685	28382	1,29	63	309	57	269
140	140	66	8,6	109	5,7	3,4		3,84	19,1	18,2	14,3	573	81,9	5,61	47,7	95,4	35,2	10,7	1,40	8,85	16,05	17,70	34	11	16	6,29	3,56	1540	27117	1,56	72	339	65	293
160	160	74	9,5	125	6,3	3,8		3,89	19,8	22,8	17,9	935	117	6,40	68,0	136	54,7	14,8	1,55	12,28	22,20	24,55	40	11	17	6,91	5,40	3138	26190	1,80	80	365	72	313
180	180	82	10,4	142	6,9	4,1		3,94	20,6	27,9	21,9	1450	161	7,20	93,4	187	81,3	19,8	1,71	16,50	29,70	33,00	44	13	19	7,53	7,89	5924	25442	2,04	88	393	79	335
200	200	90	11,3	159	7,5	4,5		3,98	21,2	33,4	26,2	2140	214	8,00	125	250	117	26,0	1,87	21,58	39,00	43,16	48	13	21	8,15	11,2	10520	24894	2,22	96	422	86	359

Esfuerzos Internos (Solicitaciones)

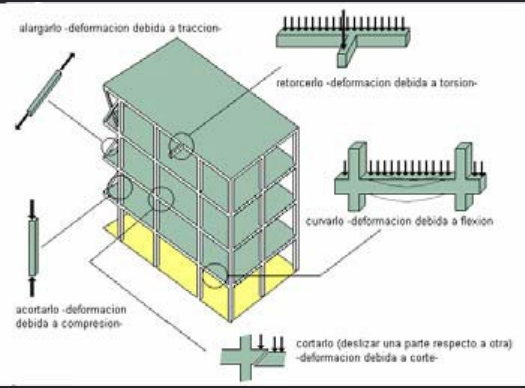


Tipos de Solicitaciones

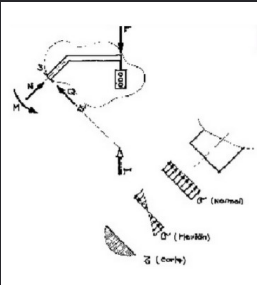
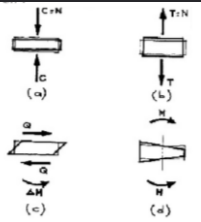
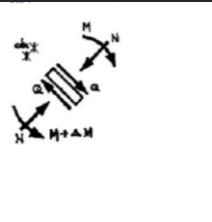
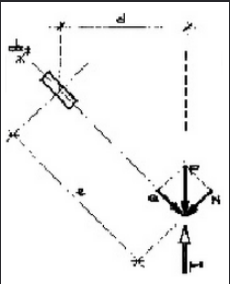
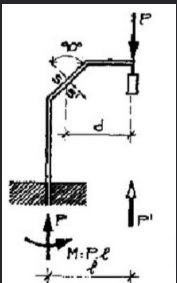
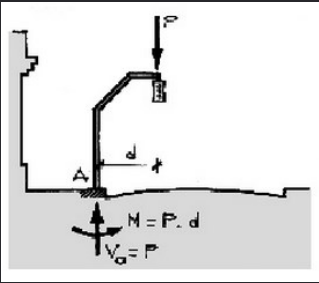
- **Producidas por fuerzas**
 - Tracción
 - Compresión
 - Corte
- **Producidas por pares**
 - Flexión
 - Torsión

Evitan colapso o grandes deformaciones en la estructura.

Representación de Solicitaciones



TRACCIÓN Recibe dos fuerzas o cargas opuestas que provocan el estiramiento de la estructura.	COMPRESIÓN Recibe dos fuerzas o cargas opuestas que provocan que la estructura se comprima por aplastamiento.	FLEXIÓN Recibe fuerzas o cargas que provocan una curvatura de la estructura.
TORSIÓN Recibe dos fuerzas o cargas opuestas que provocan un retorcimiento de la estructura.	CORTE O CIZALLADURA Recibe dos fuerzas o cargas opuestas que tienden a romper o cortar la estructura.	PANDEO Recibe dos fuerzas o cargas opuestas que tienden la flexión de la estructura.



Deformaciones por Solicitaciones

Solicitación

Resultante que deforma el material

Respuesta estructural

Fuerzas exteriores generan esfuerzos internos

Mecanismo

Carga → Solicitación → Deformación → Esfuerzo → Tensión

Graficos: [3] "Intuición y razonamiento en el diseño estructural" D. Moisset de Espanés

Concepto de Tensión

Concepto abstracto
No tiene existencia real
No puede medirse directamente

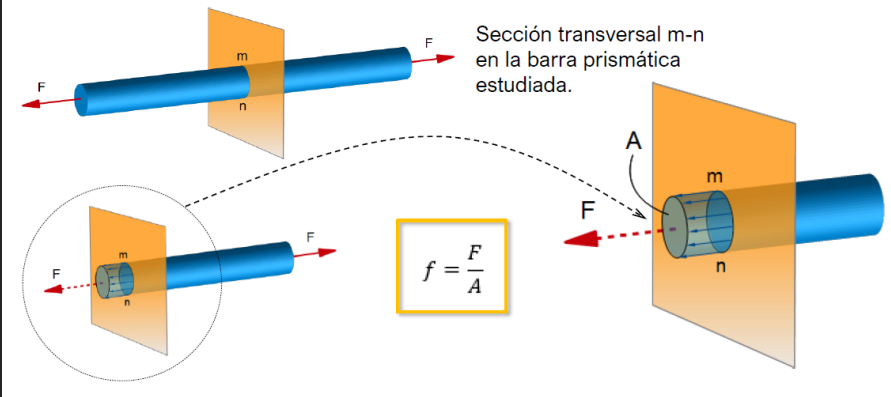
Desarrollo histórico
Galileo (1638)
Robert Hooke
Navier (teoría de flexión)

Función
Vincular fuerzas externas con esfuerzos internos
Indicador de resistencia del material

Fórmulas básicas
 $F = N / A$
 $F_vy = a \cdot V / A$
 $F_y = M / S_x$



TENSIONES



Diseño estructural I Guía de Estudio 5B– ARQ. – FI - UNCuyo

Las tensiones no dependen del material, sino de la geometría de la sección y la sollicitación aplicada.

Relación Tensión-Solicitación

$F = N/A$

Axial

$F_v = \alpha \cdot V/A$

Corte

Depende de la forma de sección

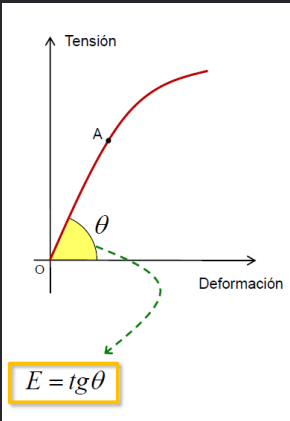
$F_y = M/S$

Flexión

$F_t = M \cdot r/I$

Torsión

Diseño estructural I Guía de Estudio 5B
– ARQ. – FI – UNCuyo



Ley de Hooke y Módulo de Elasticidad

Ley de Hooke

$f = E \cdot \varepsilon$

Relación lineal tensión-deformación

Módulo de Elasticidad

Representa rigidez del material

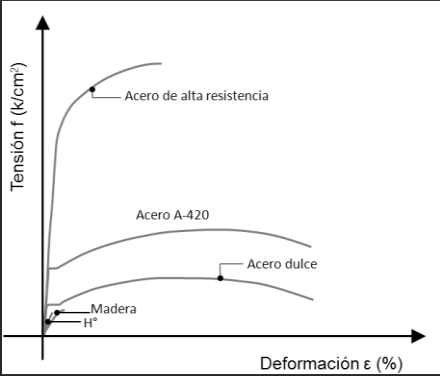
Característica mecánica independiente de forma

Valores típicos

Acero: 210.000 MPa

Hormigón: 20.000-30.000 MPa

Madera: 8.000-12.000 MPa



Control de Deformaciones

- 1

Existencia real

Pueden observarse y medirse
- 2

Factores determinantes

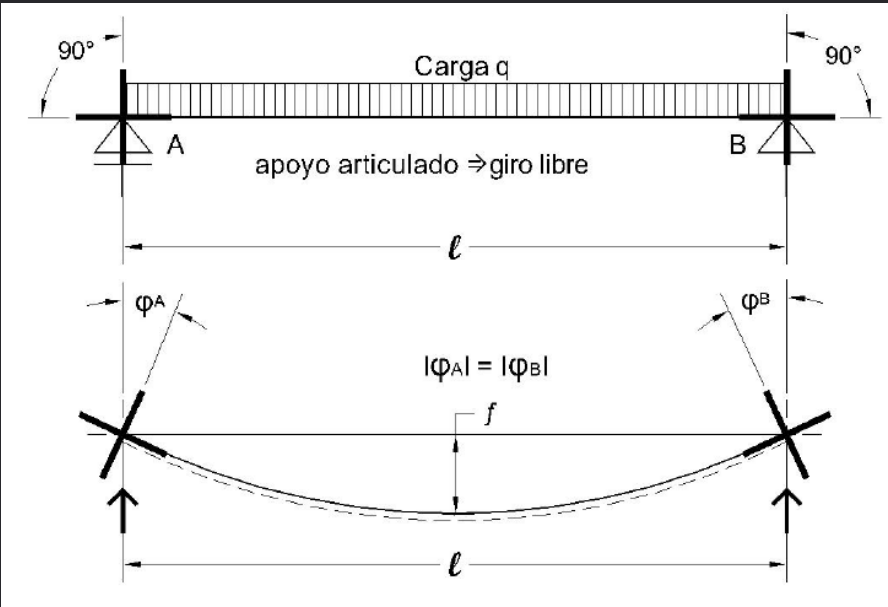
Solicitación, sección y material
- 3

Límite crítico

Si deformación > límite → colapso
- 4

Criterio de seguridad

flecha ≤ flecha admisible



Limitación de Flechas

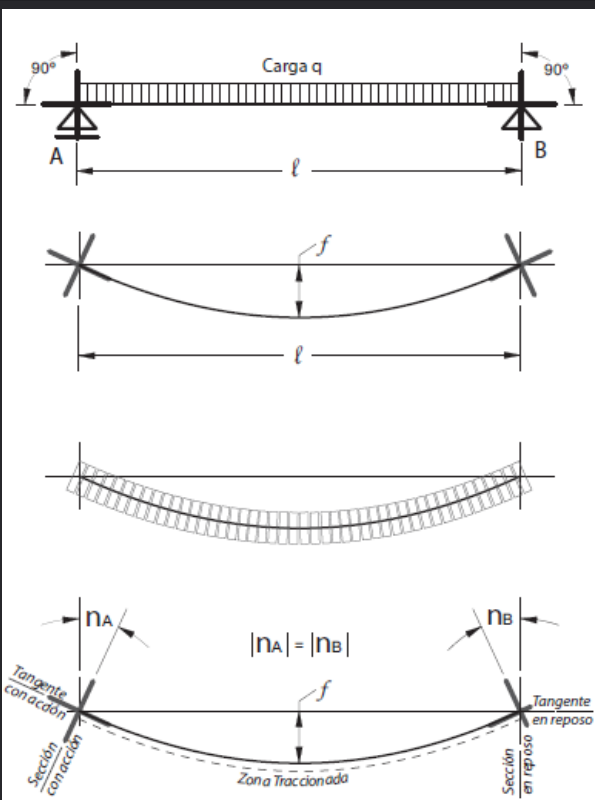
- ↓

Flecha máxima
Descenso en centro de viga
- ⚠

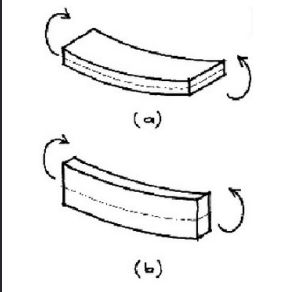
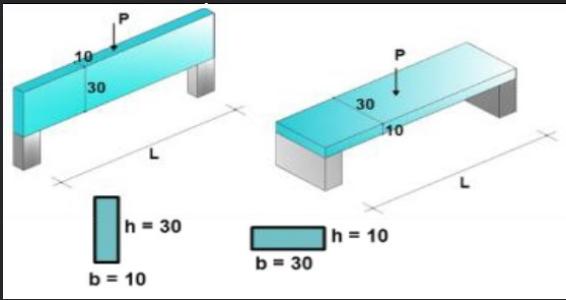
Problemas
Afecta funcionalidad, sensación de inseguridad
- $\frac{-|+}{x|=-}$

Limitación
Fracción de longitud: **f = L/factor**
- Valor admisible**
Madera y acero: **f ≤ L/300**

$$x_A = x_B = \frac{l}{2} \quad \therefore \quad f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q l^4}{E I}$$
$$\theta_A = \theta_B = \frac{q l^3}{24 E I}$$

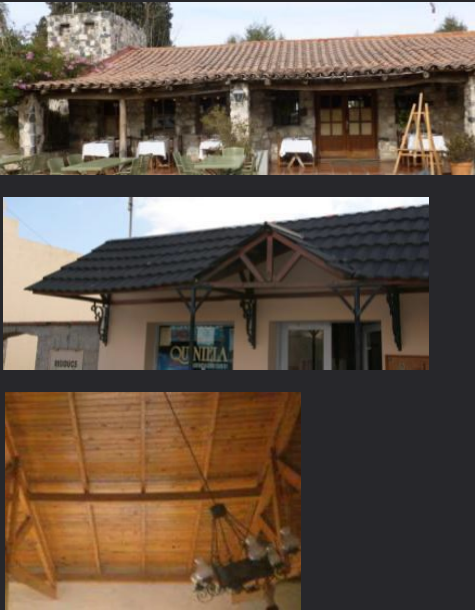
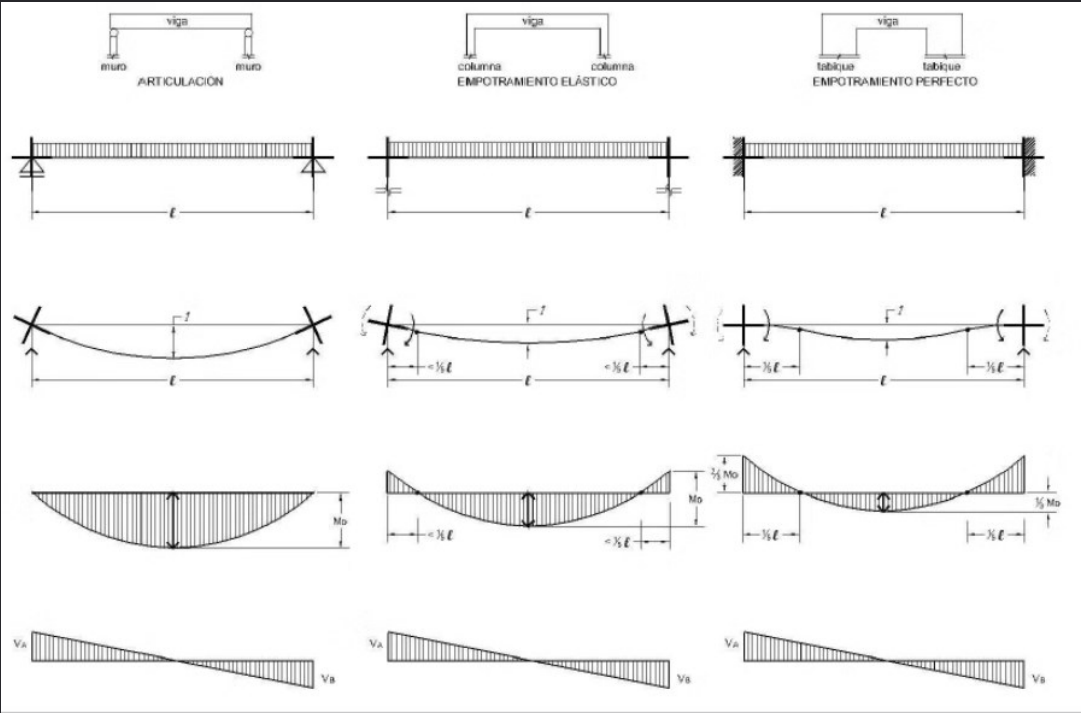


Factores que Afectan la Deformación



- Condiciones Internas**
Material: Módulo de Elasticidad **[E]**
- Geometría**
Forma: Momento de Inercia **[Ix]**
- Condiciones Externas**
Tipo/posición de cargas
- Apoyos**
Vínculos estructurales

Tipos de Deformación



Condición de Rigidez

Flecha $\leq$ Flecha Admisible

Condición fundamental de diseño

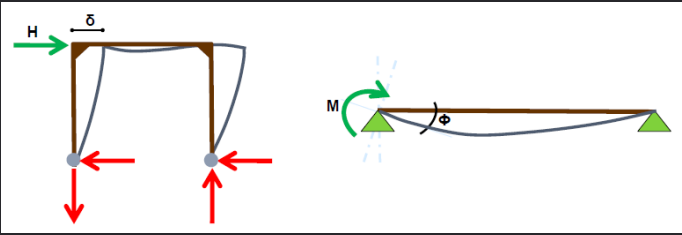
Cargas de Servicio

$q = D + L$ (Estado Límite de Servicio)

Dimensionamiento

En vigas de acero y madera, las flechas determinan las dimensiones necesarias

Concepto de Rigidez



Definición

Relación acción/deformación

Formulación

$K = P / d = f (L, A, E)$

Traslacional

$R = H / d$

Rotacional

$R = M / f = (E \cdot I_x) / L$

Rigidez vs Resistencia



Rigidez

- Relación con deformaciones
- Mantiene forma original
- Preserva funcionalidad



Resistencia

- Relación con rotura
- Evita colapso estructural
- Garantiza seguridad

HORMIGÓN: LOSAS

Tabla 9.5.a) Altura o espesor mínimo de vigas no pretensadas o losas armadas en una dirección, para el caso en que no se realice un cálculo de las flechas

ELEMENTOS	ALTURA O ESPESOR MÍNIMO, h			
	Simplemente apoyados	Con un extremo continuo	Ambos extremos continuos	En voladizo
	Elementos que no soporten o estén vinculados a tabiques divisorios u otro tipo de elementos susceptibles de sufrir daños por grandes flechas			
Losas macizas armadas en una dirección	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
Vigas o losas nervuradas en una dirección	$l/16$	$l/18,5$	$l/21$	$l/8$

☐ La luz l se expresa en mm.

☐ Los valores dados en esta tabla son para elementos de hormigón de peso normal ($w_c = 2500 \text{ kg/m}^3$) y armadura con $f_y = 420 \text{ MPa}$.

Para otras condiciones, los valores se deben modificar como se indica a continuación:

a) Para hormigón liviano estructural con w_c comprendido entre 1500 y 2000 kg/m³, los valores de la Tabla 9.5.a) se deben multiplicar por (1,65 – 0,0003 w_c), valor que debe ser igual o mayor que 1,09.

b) Para $f_y \neq 420 \text{ MPa}$, los valores de esta Tabla se deben multiplicar por la expresión $(0,4 + f_y / 700)$.

LOSAS ARMADAS en 2 direcciones		
ESQUEMA	ESTRUCTURAL	m
		50
		55
		60

Resumen de Criterios

Rigidez

Controla deformaciones

Resistencia

Controla tensiones

Hormigón

Losas: L/h = 20-25

Criterios para Vigas de Hormigón

Condición	Altura de viga
Viga simplemente apoyada	$h = L/10$
Viga continua	$h = L/12$
Voladizo	$h = L/5$
Losa simplemente apoyada	$h = L/20$

ESQUEMA ESTRUCTURAL	m
	8
	16
	22

	$M = \frac{Fl}{4}$	$R_A = R_B = \frac{F}{2}$	$x_A = x_B = \frac{l}{2} \quad f = \frac{Fl^3}{48EI}$ $\theta_A = \theta_B = \frac{Fl^2}{16EI}$		$M = Fl$		$f = \frac{Fl^3}{3EI}$ $\theta = \frac{Fl^2}{2EI}$
	$M = \frac{1}{8}ql^2$	$R_A = R_B = \frac{q}{2}l$	$x_A = x_B = \frac{l}{2} \quad f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI}$ $\theta_A = \theta_B = \frac{ql^3}{24EI}$		$M = \frac{1}{2}ql^2$		$f = \frac{ql^4}{8EI}$ $\theta = \frac{ql^3}{6EI}$

Criterios para Acero



Pre Dimensionado

Vigas: $h = L/22$
Correas (Perfil C): $h = L/30$

Verificación

$f \leq f_{adm} = L/300$

Cálculo

Procedimiento LRFD

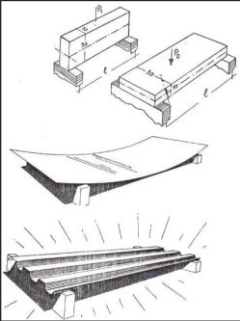
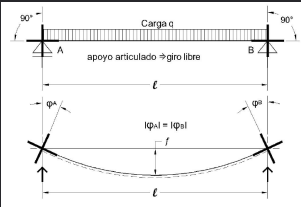


Tabla A-L.4.1. Valores limites para deformaciones y desplazamientos laterales (a) (b)

EDIFICIOS INDUSTRIALES				
	Elemento	Flecha total	Flecha por carga variable Por	
Deformaciones verticales	Barras soportando cubiertas rígidas	L/200	Sobrecarga Útil	L/240
	Barras soportando cubiertas flexibles	L/150	Sobrecarga Útil	L/180
	Barras soportando pisos	L/250	Sobrecarga Útil	L/300
	Vigas carril para grúas de capacidad ≥ 200 Kn		Rueda sin impacto	L/800 (c)
	Vigas carril para grúas de capacidad < 200 Kn		Rueda sin impacto	L/600 (c)
Desplazamiento lateral (d)	Vigas carril		Frenado transversal	L/600 (c)
	Desplazamiento de columnas con respecto a base por acción de viento	H/150	Viento	H/160
	Desplazamiento de columnas con respecto a base por acción de puente grúa.		Frenado puente Grúa	H/400 (c)
PARA OTROS EDIFICIOS				
Deformaciones verticales	Techos en general	L/200	Sobrecarga Útil	L/250
	Techos con carga frecuente de personas (no mantenimiento)	L/250	Sobrecarga Útil	L/300
	Pisos en general	L/250	Sobrecarga Útil	L/300
	Barras de pisos o techos que soporten elementos y revestimientos susceptibles de fisuración	L/300	Sobrecarga Útil	L/350
	Pisos que soporten columnas	L/400	Sobrecarga Útil	L/500
	Donde la deformación puede afectar el aspecto	L/250		
Desplazamiento lateral (d)	Desplazamiento total del edificio referido a su altura total		Viento	Hr/300
	Desplazamiento relativo de pisos cuando cerramientos y divisiones no tienen previsiones especiales para independizarse de las deformaciones de la estructura		Viento	Hb/400
	Desplazamiento relativo de pisos cuando cerramientos y divisiones tienen previsiones especiales para independizarse de las deformaciones de la estructura		Viento	Hb/300

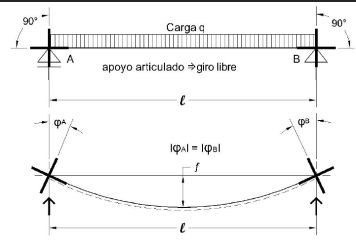
- OBSERVACIONES**
- (a) La deformación vertical debida a acciones de servicio $f(máx)$ a comparar con los valores límites de la tabla será: $f(máx) = f - f_0$
 f = deformación total calculada con la combinación de acciones más desfavorable incluyendo eventuales deformaciones por efectos de larga duración (fluencia lenta).
 f_0 = contraflecha adoptada.
- (b) L = distancia entre apoyos. Para ménsulas L= 2 veces la longitud del voladizo.
H = altura de la columna.
Hr = altura total del edificio.
Hb = altura del piso.
- (c) Los valores para grúas son orientativos. Para operación de grúa sensible a deformaciones verticales o desplazamientos laterales deberán fijarse límites más rigurosos.
- (d) Para combinaciones con acciones sísmicas ver el Reglamento INPRES-CIRSOC 103-2005

Criterios para Madera

Tabla 3.2.3-1 Deformaciones admisibles recomendadas para las vigas

Destino de la construcción	Deformación instantánea originada por las cargas variables	Deformación final neta originada por la totalidad de las cargas
Viviendas y oficinas	$\Delta_{i(V)} \leq L/360$ (voladizos $L/180$)	$\Delta_{fnet(TC)} \leq L/300$ (voladizos $L/150$)
Comercio, recreación e institucional	$\Delta_{i(V)} \leq L/360$ (voladizos $L/180$)	$\Delta_{fnet(TC)} \leq L/240$ (voladizos $L/120$)
Construcciones industriales o rurales con bajo factor de ocupación	-	$\Delta_{fnet(TC)} \leq L/200$ (voladizos $L/100$)

siendo:
 L la luz de cálculo de la viga;
 $\Delta_{i(V)}$ la deformación instantánea producida por las cargas variables;
 $\Delta_{fnet(TC)}$ la deformación final neta producida por la totalidad de las cargas.



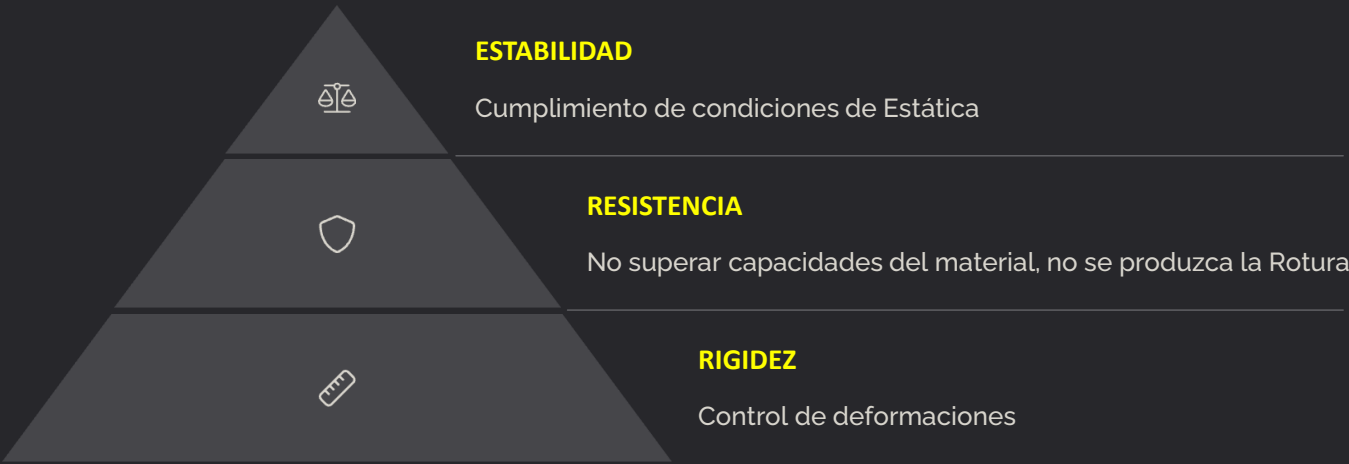
Deformación
Mayor que en otros materiales

Dimensiones
 $h = L/17$ a $L/20$

Verificación
 $f \leq f_{adm} = L/300$

FUNDAMENTOS ESTRUCTURALES

Los Sistemas Estructurales, dentro del ámbito de la Arquitectura, deben ser vistos desde 3 puntos bien definidos:



VARIABLES DE RIGIDEZ ESTRUCTURAL

- **Material**
Parámetro **E** de rigidez
- **Vínculos**
Tipo y restricciones de grados de libertad
- **Sección**
Parámetro geométrico **I_x**
- **Longitud**
Del elemento estructural
- **Cargas**
Tipo y disposición

PROCESO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

ANÁLISIS DE CARGAS

Permanentes y variables

EQUILIBRIO

Cálculo de reacciones

SOLICITACIONES

Momento, normal, cortante, torsión

RESISTENCIA

Dimensionado de secciones

RIGIDEZ

Control de deformaciones

