

Actas de la III Jornada Iberoamericana sobre madera estructural del género *Populus*

2.4. Estudio comparado de los métodos de cálculo basados en tensiones admisibles y los Estados Límite

Autores: Leandro Morillas

Contacto: lmorillas@arq.uva.es

Afiliaciones: Dpto. Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. E.T.S. de Arquitectura. Universidad de Valladolid.

Los métodos de Tensiones Admisibles y Estados Límite.

III Jornada Iberoamericana sobre madera estructural del género *Populus*
Valladolid, 16 de junio de 2015

Leandro Morillas

lmorillas@arq.uva.es

Dpto. Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad de Valladolid

Métodos ¿para qué?

Los métodos de tensiones admisibles y estados límites

- Su objeto es que la estructura sea segura, usable, duradera y económica.
- Son dos enfoques científicos del problema de la seguridad estructural.
- Parten de la misma base pero el tratamiento que dan a la incertidumbre es distinto.
- Dan respuesta al balance entre seguridad y coste.
- La seguridad de la edificación es un valor aceptado socialmente.

Antes del desarrollo de estos métodos, el proyecto de estructuras se basaba prácticamente en sentido común, juicio técnico, ensayo y error, proporciones.

Los métodos de tensiones admisibles y estados límites

Las bases comunes.

¿Cuál de estas expresiones conduce a la seguridad?

CAPACIDAD < DEMANDA
CAPACIDAD = DEMANDA
CAPACIDAD > DEMANDA

Índice

El método de las tensiones admisibles

Criterio de aceptación proyecto
Incertidumbres en la acción y sus efectos.
Incertidumbres en la capacidad.
Cuestiones de fiabilidad.

El método de estados límite

El método de las tensiones admisibles

(working/allowable/permissible stress method)

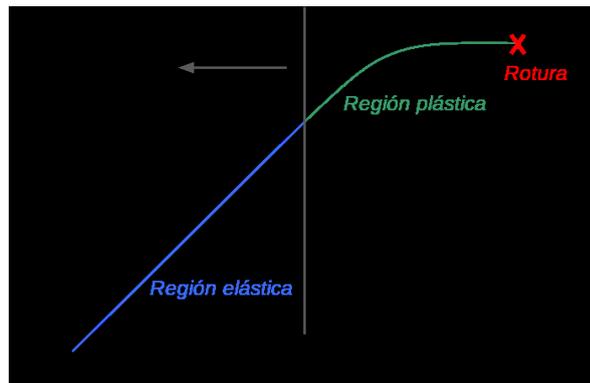
- Fue la primera aproximación científica.
- Parte de las Leyes de Newton y la teoría de elasticidad.
- Se basa en asegurar que las tensiones son menores que las admisibles.

DEMANDA < CAPACIDAD

DEMANDA < CAPACIDAD / FS

$$\sigma < \sigma_{adm} = f_y / FS$$

- Toda la incertidumbre en la demanda y la capacidad se concentra en el factor de seguridad FS.
- Equivale a reducir la resistencia del material.



Tensiones admisibles: un caso

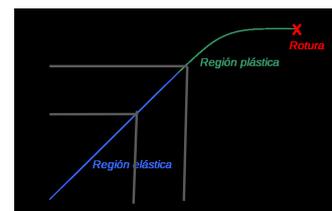
- Calcular el área necesaria para un cable en tensión.
- Estimamos las acciones: 15kN
 - peso propio PP=10kN y cuatro personas=5kN
- Tensión de fluencia media del material $f_y = 450\text{MPa}$
- Si adopto un $FS = \frac{2}{3}$, la tensión admisible $f_{adm} = \frac{2}{3} f_y = 300\text{MPa}$

$$\sigma < \sigma_{adm} = f_y / FS$$

$$15 \text{ kN} / A = 300 \text{ MPa} ; A = 50\text{mm}^2$$

En flexión (Bernouilli)

$$M/W < \sigma_{adm} ; W = I / y_{max}$$



El método de tensiones admisibles: Ventajas

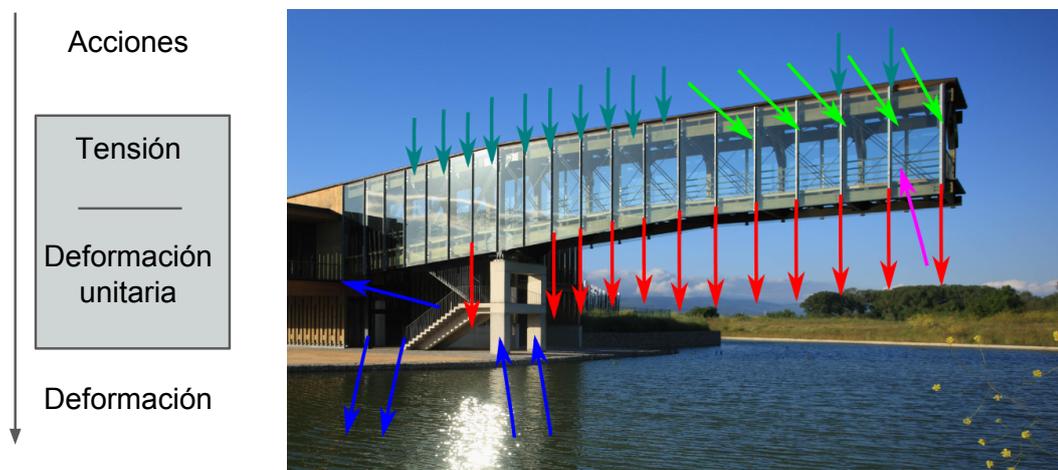
- Sencillo (determinista)
- Directo
- Pocos recursos numéricos



Calculadora 1971

El método de tensiones admisibles: Desventajas

- El método es sencillo pero la realidad no tanto.
- No da una respuesta a algunas incertidumbre.



El método de tensiones admisibles: Desventajas (i)

Desventajas (i): Se basa (casi solo) en tensión

La tensión en el material es un factor importante, pero no el único.

¿Qué pasa en casos de..?

Estabilidad

Vuelco

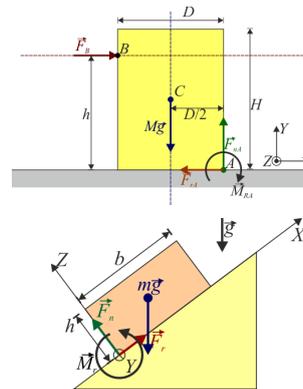
Rozamiento/Deslizamiento

Fatiga

No linealidad (Curvatura de secciones)

Fisuración

Fluencia



El caso de máxima carga no es siempre el más desfavorable: Flexocompresión, muros de sótano, arcos.

El método de tensiones admisibles: Desventajas (i)

Desventajas (i): Se basa (casi solo) en tensión

La tensión en el material es un factor importante, pero no el único.

Aunque la tensión se mantenga admisible, la experiencia ha demostrado que el método tiene consecuencias no deseadas, por ejemplo:

Usabilidad: vibraciones.

Apariencia: deformaciones excesivas, deformaciones en el tiempo.

Durabilidad: fisuración de hormigones.

El método de tensiones admisibles: Desventajas (ii)

Desventajas (ii): Incertidumbres en la acción

La acción es la principal fuente de incertidumbre.

Todas las acciones son dinámicas. Oscilan en el tiempo (años).

- Permanentes **G**(peso propio, empuje, pretensado)
- Variables **Q**(uso, viento, nieve, temperatura)
- Accidentales **A**(explosión, sismo, incendio)

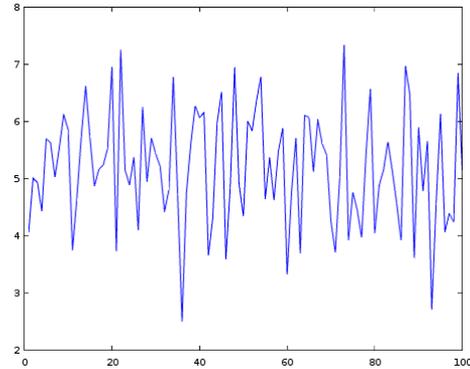


Table 2.2 – Examples of load-duration assignment

Load-duration class	Examples of loading	Order of accumulated duration of characteristic load
Permanent	self-weight	more than 10 years
Long-term	storage	6 months – 10 years
Medium-term	imposed floor load, snow	1 week – 6 months
Short-term	snow, wind	less than one week
Instantaneous	wind, accidental load	

El método de tensiones admisibles: Desventajas (ii)

Desventajas (ii): Incertidumbres en la acción

La acción es la principal fuente de incertidumbre.

La naturaleza, intensidad, y frecuencia de cada acción es muy distinta (nieve, viento, sismo).

Hay una relación entre la vida útil de un edificio y las acciones que tiene que soportar.

Table 2.1 - Indicative design working life

Design working life category	Indicative design working life (years)	Examples
1	10	Temporary structures ⁽¹⁾
2	10 to 25	Replaceable structural parts, e.g. gantry girders, bearings
3	15 to 30	Agricultural and similar structures
4	50	Building structures and other common structures
5	100	Monumental building structures, bridges, and other civil engineering structures

(1) Structures or parts of structures that can be dismantled with a view to being re-used should not be considered as temporary.

El tiempo es la acción más intensa

Asume implícitamente que si la estructura es segura en un determinado escenario, lo será en cualquier otro. Es improbable que todas las acciones ocurran simultáneamente en un escenario apocalíptico: Mejor en combinaciones

El método de tensiones admisibles: Desventajas (iii)

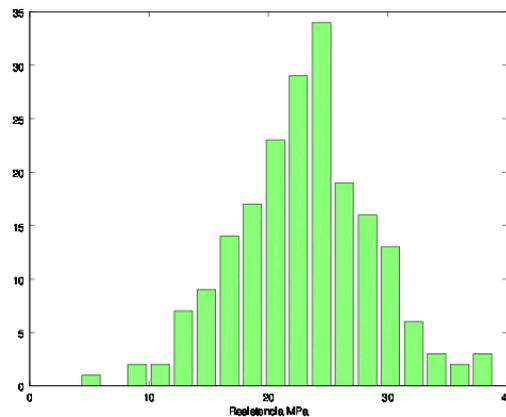
Desventajas (iii): Incertidumbres en resistencia

Son debidas a:

la variabilidad del material.

y también:

sus cambios en el tiempo.
la puesta en obra.
modelo numéricos.
errores de ejecución.



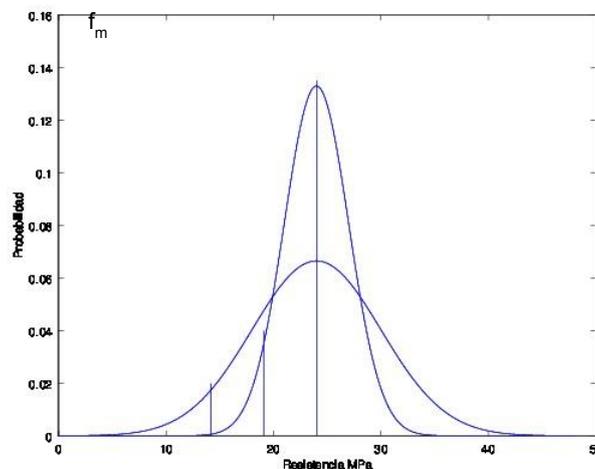
El método de los estados límite: Desventajas (iii)

Desventajas (iii): Incertidumbres en resistencia

¿Cuál es el valor de la representativo de la resistencia para no fallar casi nunca?

El valor medio no capta la variabilidad.

Necesitamos basarnos en intervalos de confianza.



El método de los estados límite: Desventajas (iii)

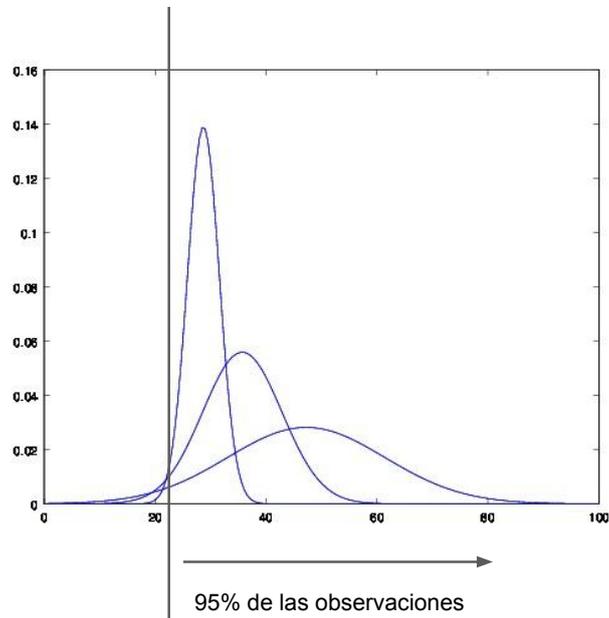
Una consecuencia:

La variabilidad penaliza.

Distribución de resistencias
para varias maderas C24

COV= 10%, 20%, 30%

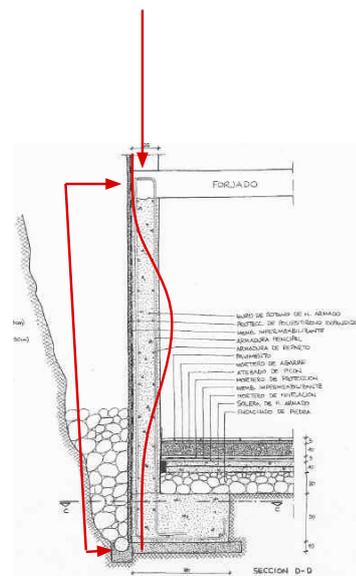
$f_k=24\text{MPa}$



El método de los estados límite: Desventajas (iv)

Desventajas (iv): La fiabilidad

- Con el método de los estados límite es complicado cuantificar la fiabilidad.
- Es difícil analizar el fallo (proyecto por capacidad).
- Produce niveles de fiabilidad heterogéneos.
- La elección del FS es algo arbitraria ¿vale para todos los usos/casos?



Mejoras de tensiones admisibles a Estados límites: novedades

<p>No sólo tensión y no sólo en un escenario</p> $E_d < R_d$ $E_d < C_d$ <p>Efectos de las acciones < Resistencia u otro criterio</p> <p>PROYECTO MULTIOBJETIVO (PRESTACIONAL)</p>	<p>La incertidumbre en los efectos de las acciones de cálculo E_d</p> <p>Coefficientes parciales de seguridad y combinación</p> $\gamma \quad \psi$
<p>La incertidumbre en los efectos de la resistencia de cálculo R_d</p> <p>Coefficientes parciales de seguridad y factor de conversión</p> $\gamma_m \quad \eta$	<p>Enfoque estadístico de la incertidumbre</p> <p>Se basa en conocimiento adquirido sobre acciones, materiales, etc.</p>

El método de los Estados Límite

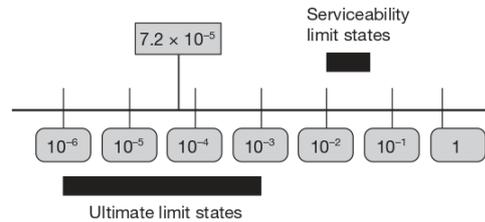
- Las bases científicas fueron sentadas por Streletzki, 1947. Su estudio estadístico del factor de seguridad estructural se introdujo en el código ruso en 1955 y sigue vigente.
- La filosofía de los Estados Límite se basa en un concepto estadístico de la seguridad y la probabilidad de fallo asociado.
- Aplica métodos estadísticos a las variaciones de las acciones y las propiedades de los materiales.
- En madera (Canáda, 1984 ; ASCE, 1995; Nueva Zelanda, 89; Australia 1994; Eurocódigo 5, 1999; Brasil ABNT 1996).
- Un poco más complicado

Estados límite 1: qué son

Los estados límite son una serie de escenarios en las que no deseamos rebasar ciertos límites.

Las normativas basadas en estados límite separan explícitamente Estados Límite Últimos (ELU) y Estados Límites de Servicio (ELS).

En cada estado se observan distintas combinaciones de las acciones en atención a su frecuencia.



ELS: 5% de excedencia anual (20)
 ELU: <1% de excedencia anual (100-500)

Estados límite últimos:

- EQU: equilibrio estático.
- STR: fallo interno, deformación.
- GEO: fallo del terreno
- FAT: Fatiga
- UPL: Empuje vertical

$$E_d < R_d$$

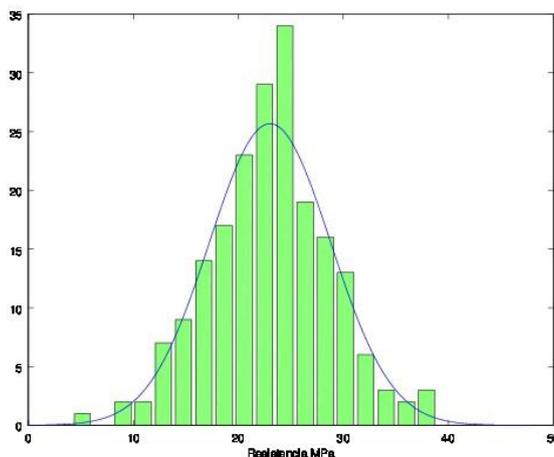
Estados límite de servicio

- Fisuración
- Deformación excesiva
- Vibración

$$E_d < C_d$$

Estados límite 2: incertidumbres en la resistencia/capacidad.

Las propiedades resistentes de los materiales son variables. La distribución de las propiedades de un material puede ajustarse a una distribución gaussiana o normal.



Se necesitan dos parámetros para definir una distribución normal:

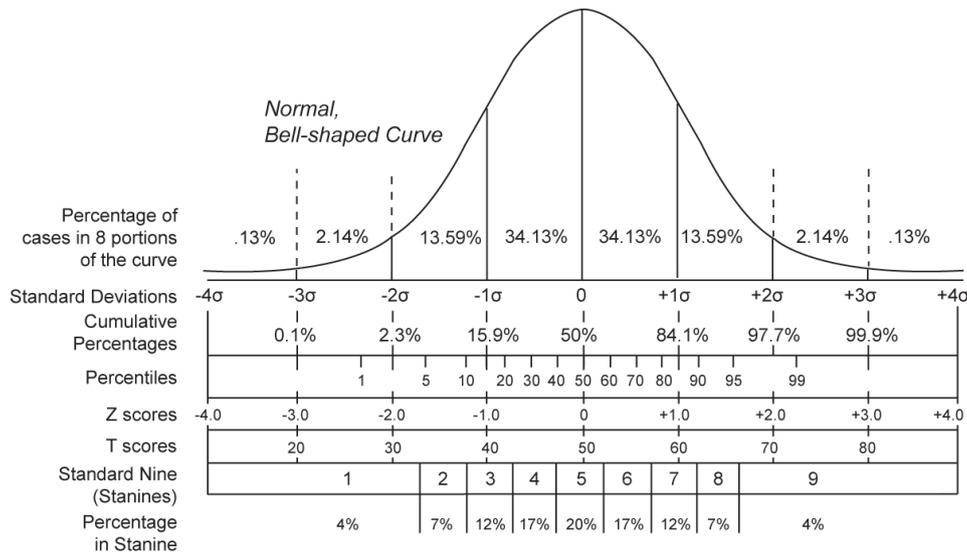
La media ($\mu=24\text{MPa}$)
 y la desviación std ($\sigma=6\text{MPa}$)

La media ($\mu=24\text{MPa}$)
 y $\text{COV}=\sigma/\mu=0.25$

- Madera 10-30%
- Acero 3-7%
- Hormigón 10-30%
- Piezas cerámicas 40%
- Morteros 15%

Estados límite 2: incertidumbres en la resistencia/capacidad.

La distribución normal es bien conocida



Estados límite 2: incertidumbres en la resistencia/capacidad.

Resistencia media f_m

Resistencia **característica** f_k

Cubre el 95% de los casos.

Está 1.64*desviaciones desde f_m

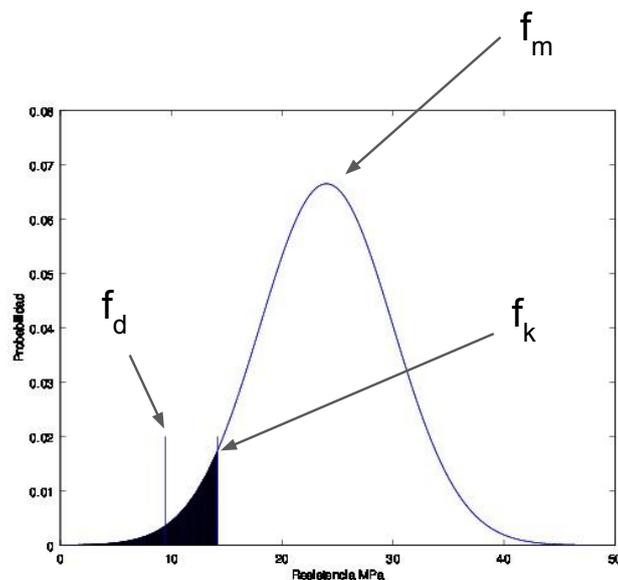
Resistencia **de cálculo** f_d

$$X_d = \eta X_k / \gamma_m$$

Aparece un factor de seguridad del material γ_m que tiene en cuenta la variabilidad de las propiedades del material.

El valor de γ_m cambia en ELS,ELU.

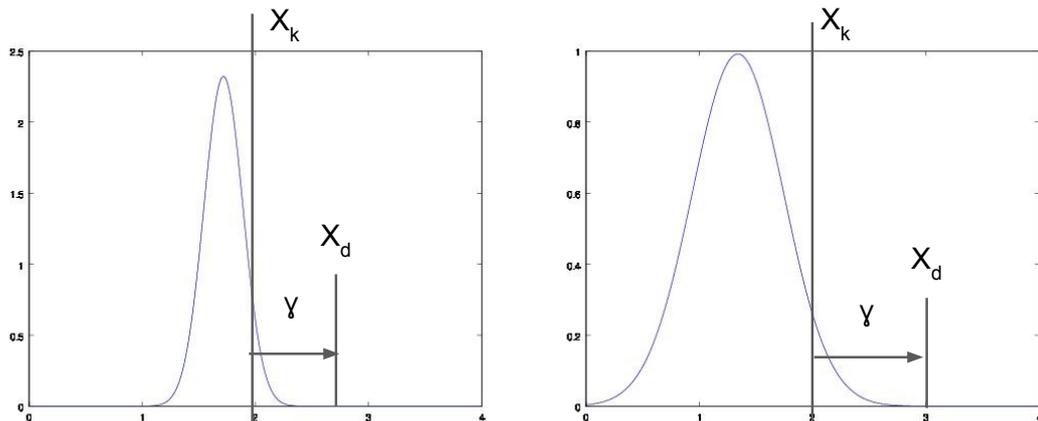
El factor η tiene en cuenta otros factores (escala, humedad, u otros)



Estados límite 3: Incertidumbre en la acción

Las acciones también son variables.

Tienen un valor característico (2kN/m^2) y otro de cálculo.



*También distrib: Gumbel, Gamma(larga duracion), exponencial (breve),

Estados límite 3: Incertidumbre en la acción

TABLE F2 New Zealand Standard
ANNUAL PROBABILITY OF EXCEEDANCE OF THE DESIGN EVENTS
FOR ULTIMATE LIMIT STATES

- Cada acción tiene una probabilidad de excedencia anual distinta.
- Debemos combinar las acciones suponiendo que son sucesos independientes.
- La importancia y vida útil del edificio son factores clave.

Design working life	Importance level	Design events for safety in terms of annual probability of exceedance			
		Wind		Earthquake	Snow
		Cyclonic	Non-cyclonic		
Construction equipment, e.g., props, scaffolding, braces and similar	2	1/250	1/100	1/50	1/100 *
Less than 6 months	1	1/250	1/25	1/25	1/25 * †
	2	1/250	1/100	1/50	1/100 *
	3	1/500	1/250	1/100	1/250 *
	4	1/1000	1/1000	1/250	1/1000
5 years	1	1/250	1/25	1/25	1/25 †
	2	1/250	1/250	1/50	1/250 *
	3	1/500	1/500	1/100	1/500
	4	1/1000	1/1000	1/250	1/1000
25 years	1	1/250	1/50	1/25	1/50 * †
	2	1/250	1/250	1/50	1/250 *
	3	1/500	1/500	1/100	1/500
	4	1/1000	1/1000	1/250	1/1000
50 years	1	1/250	1/100	1/50	1/100 *
	2	1/500	1/500	1/150	1/500
	3	1/1000	1/1000	1/250	1/1000
	4	1/2500	1/2500	1/500	1/2500
100 years or more	1	1/500	1/250	1/100	1/250
	2	1/1000	1/1000	1/250	1/1000
	3	1/2500	1/2500	1/500	1/2500
	4	‡	‡	‡	‡

Estados límite 3: Incertidumbre en la acción. El valor de cálculo:

ELU	ELS
Persistente	Característica (irreversibles)
$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,i} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$	$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
Accidental	Frecuente (reversibles)
$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$	$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$
Sismo	Cuasi-permanente (larga duración)
$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$	$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$

<p>Cada combinación tiene una carga variable principal (Q1) o una acción accidental</p>	<p>Tipos de acciones características (k) G: Permanentes P: Pretensado Q: Variables A_d: Accidental A_{Ed}: Sismo</p>	<p>Coefficientes parciales γ_G, γ_k, γ_P Ψ: de simultaneidad</p>
---	---	--

Estados límite 3: Incertidumbre en la acción

Los coeficientes (EC-0)

Action	γ _G	γ _k	γ _P
Imposed loads in buildings, category (see EN 1991-1-1)			
Category A : domestic, residential areas	0,7	0,5	0,3
Category B : office areas	0,7	0,5	0,3
Category C : congregation areas	0,7	0,7	0,6
Category D : shopping areas	0,7	0,7	0,6
Category E : storage areas	1,0	0,9	0,8
Category F : traffic area, vehicle weight ≤ 30kN	0,7	0,7	0,6
Category G : traffic area, 30kN < vehicle weight ≤ 160kN	0,7	0,5	0,3
Category H : roofs	0	0	0
Snow loads on buildings (see EN 1991-1-3)*			
Finland, Iceland, Norway, Sweden	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude H > 1000 m a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude H ≤ 1000 m a.s.l.	0,50	0,20	0
Wind loads on buildings (see EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperature (non-fire) in buildings (see EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

NOTE The ψ values may be set by the National annex.
 * For countries not mentioned below, see relevant local conditions.

Table A1.4 - Design values of actions for use in the combination of actions

Combination	Permanent actions G _d		Variable actions Q _d	
	Unfavourable	Favourable	Leading	Others
Characteristic	G _{k,j,sup}	G _{k,j,inf}	Q _{k,1}	ψ _{0,i} Q _{k,i}
Frequent	G _{k,j,sup}	G _{k,j,inf}	ψ _{1,1} Q _{k,1}	ψ _{2,i} Q _{k,i}
Quasi-permanent	G _{k,j,sup}	G _{k,j,inf}	ψ _{2,1} Q _{k,1}	ψ _{2,i} Q _{k,i}

EQU

$\gamma_{G,j,sup} = 1,10$
 $\gamma_{G,j,inf} = 0,90$
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)

STR

$\gamma_{G,j,sup} = 1,35$
 $\gamma_{G,j,inf} = 1,00$
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)
 $\xi = 0,85$ (so that $\xi \gamma_{G,j,sup} = 0,85 \times 1,35 \approx 1,15$).
 See also EN 1991 to EN 1999 for γ values to be used for imposed deformations.

Estados límite 3: Incertidumbre en la acción

Coeficiente parciales para todo.

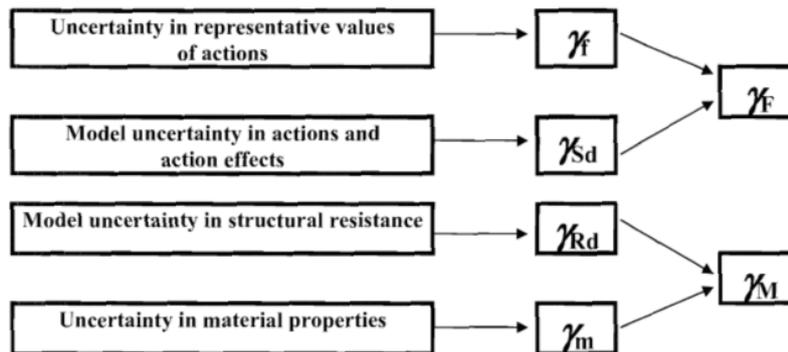


Figure C3 - Relation between individual partial factors

Estados límite 3: Incertidumbre en la acción. Un ejemplo.

Calcular la carga lineal de cálculo sobre una correa de cubierta q_d

Valores característicos de la acción q_k

- PP: peso propio: 1.5kN/m
- SC1: sobrecarga uso: 1kN/m ($\Psi_0=0.7$)
- SCN: nieve: 0.5kN/m ($\Psi_0=0.5$)
- V1: viento: +-1kN/m ($\Psi_0=0.6$)

En ELU, combinación persistente

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$1.35 \cdot \text{PP} + 1.50 \cdot \text{SC1} + 1.50 \cdot 0.5 \cdot \text{SCN} + 1.50 \cdot 0.6 \cdot \text{V1}$$

$$1.35 \cdot \text{PP} + 1.50 \cdot \text{SCN} + 1.50 \cdot 0.7 \cdot \text{SC1} + 1.50 \cdot 0.6 \cdot \text{V1}$$

$$1.35 \cdot \text{PP} + 1.50 \cdot \text{V1} + 1.50 \cdot 0.7 \cdot \text{SC1} + 1.50 \cdot 0.5 \cdot \text{SCN}$$

$$1.00 \cdot \text{PP} - 1.50 \cdot \text{V1}$$

Estados límite 3: Incertidumbre en la acción. Un ejemplo (bis)

Carga lineal sobre una correa de cubierta

Valores característicos de la acción

- PP: peso propio: 2kN/m
- SC1: sobrecarga uso: 1kN/m ($\Psi_0=0.7$)
- SCN: nieve: 0.5kN/m ($\Psi_0=0.5$)
- V1: viento: 0.2kN/m ($\Psi_0=0.6$)

En ELS, combinación característica

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$PP + SC1 + 0.5 * SCN + 0.6 * V1$$

$$PP + SCN + 0.7 * SC1 + 0.6 * V1$$

$$PP + V1 + 0.7 * SC1 + 0.5 * SCN$$

Calculamos

- wc contraflecha (valor característico)
- w1 con el valor característico de PP.
- w2 con la combinación cuasi-permanente
- w3 con la combinación característica de las SC.

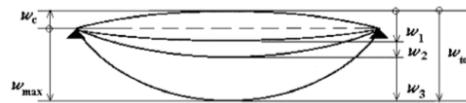
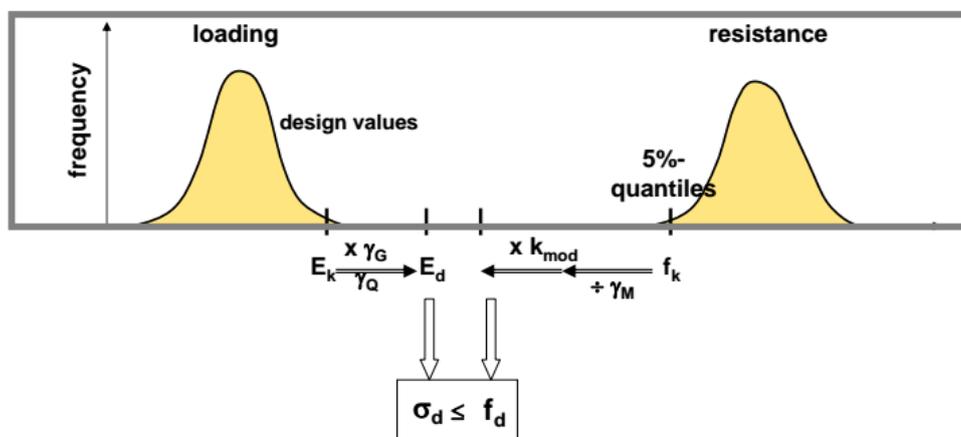


Figure A1.1 - Definitions of vertical deflections

Key :

- w_c Precamber in the unloaded structural member
- w_1 Initial part of the deflection under permanent loads of the relevant combination of actions according to expressions (6.14a) to (6.16b)
- w_2 Long-term part of the deflection under permanent loads
- w_3 Additional part of the deflection due to the variable actions of the relevant combination of actions according to expressions (6.14a) to (6.16b)
- w_{tot} Total deflection as sum of w_1 , w_2 , w_3
- w_{max} Remaining total deflection taking into account the precamber

Estados límite 4: La fiabilidad



Estados límites: un resumen.



Las diferencias

Tensiones admisibles

- Acción y modelo estructural determinista.
- Una o dos situaciones de cálculo y coeficientes de seguridad.
- Métodos elásticos.
- La fiabilidad es difícil de estimar.
- Es fácil de usar

Estados límites

- Acción y modelo estructural probabilista.
 - Multitud de situaciones de cálculo y coeficientes parciales.
 - Métodos no elásticos y en rotura.
 - Consigue fiabilidad uniforme.
 - Se parece más a la realidad.
-

Más info

ASCE. 1995. Load and Resistance Factor Design Standard for Engineered Wood Construction. American Society of Civil Engineers ASCE 16-95. New York, USA

EUROCÓDIGO No 0. 1996. Basis of structural design. European Commission on standardization.

EUROCÓDIGO No 5. 1996. Design of Timber Structures. European Commission on standardization.

WALFORD, G., 1989. Conversion of the New Zealand timber design code to LSD format. Proceedings of the 1989 Pacific Timber Engineering Conference, Auckland, New Zealand

Francisco ARRIAGA, 199X. Consideraciones sobre las normas para el cálculo de estructuras de madera.

Mettem, C., and S. Tietz. "Demystifying limit states design in timber." *Structural Engineer* 77 (1999): 13-14.

Crews, Keith, and Michael Ritter. "Development of limit states design procedures for timber bridges." *National conference on wood transportation structures*. Vol. 94. Forest Products Laboratory, 1996.

Sousa, Hélder S., et al. "Onsite assessment of structural timber members by means of hierarchical models and probabilistic methods." *Construction and Building Materials* (2015).

Imágenes que no son del autor ni de dominio público

Slide 7: [Celcom](#) at the English language Wikipedia

Slide 8: <http://blogs.vitoria-gasteiz.org/medios/2014/09/18/ataria-cierra-manana-su-programacion-de-verano-con-la-actividad-familiar-te-regalaría-un-bosque/>

Slide 16: <http://amlorenz.webs.ull.es/Exp%20Graf%20Aplicada%20a%20los%20Procesos%20Construictivos/practicas/practicas%20del%20curso/practica2.htm>

Slide 30: <http://www.eurocodes.fi/1995/paasivu995/sahkoinen1995/EN%201995.pdf>

Slide 31: From Mettem et al. 1999
