

# Curso: HORMIGÓN ESTRUCTURAL 1

## MÓDULO 10: MÉTODO DE LOS ESTADOS LÍMITES

Agustin Spalvier ([aspalvier@fing.edu.uy](mailto:aspalvier@fing.edu.uy))

1<sup>er</sup> Semestre - 2024

Universidad de la República - Uruguay



- Ejemplo de diseño clásico
- Ejemplo de diseño en Estado Límite Ultimo (ELU)
- Método de los Estados Límite
- Incertidumbres de cálculo
- Elección de los coeficientes de seguridad
- Acciones, situaciones, combinaciones, e hipótesis de carga

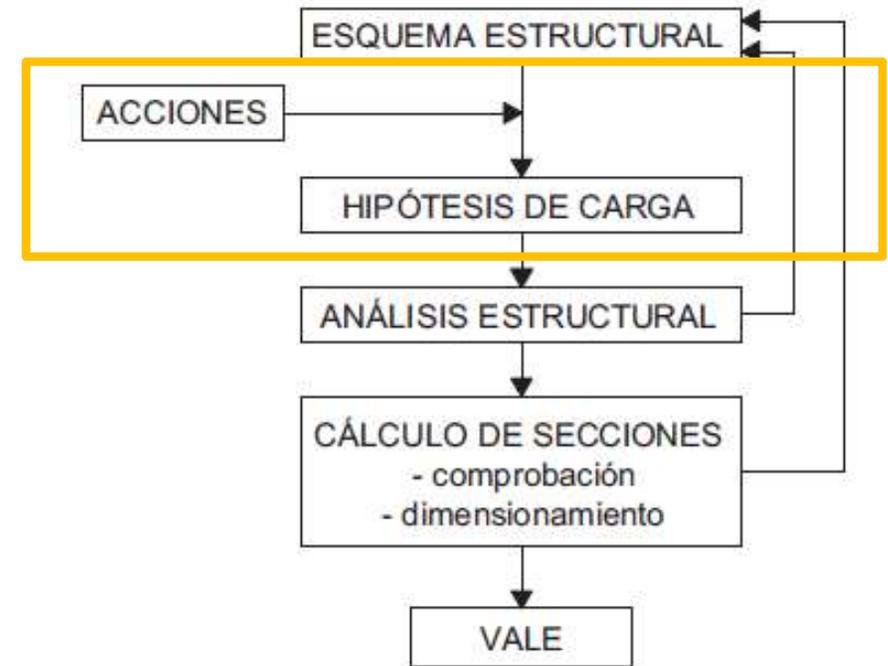


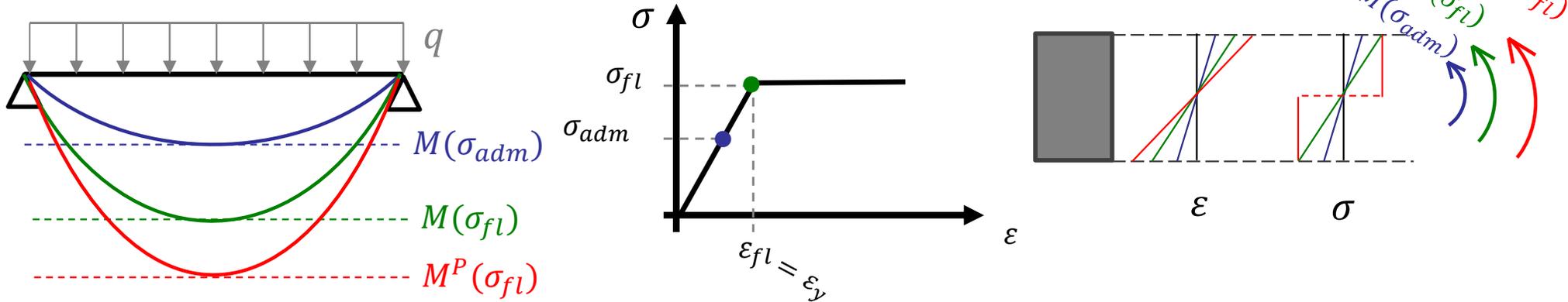
Figura 13.1 Proceso de cálculo de una estructura

**ACLARACIÓN:** Estas transparencias se preparan únicamente como una guía para las clases, las cuales cumplen la función de ser una presentación de los temas que el estudiante debe aprender para aprobar el curso, indicados en la bibliografía.

**Bibliografía:** Jiménez Montoya - 15<sup>a</sup> Ed. – Cap. 13. Bases de cálculo. Estados Límite.  
EHE-08 – Título 1<sup>o</sup> - Bases de proyecto

# Ejemplo: diseño clásico de una viga S.A.

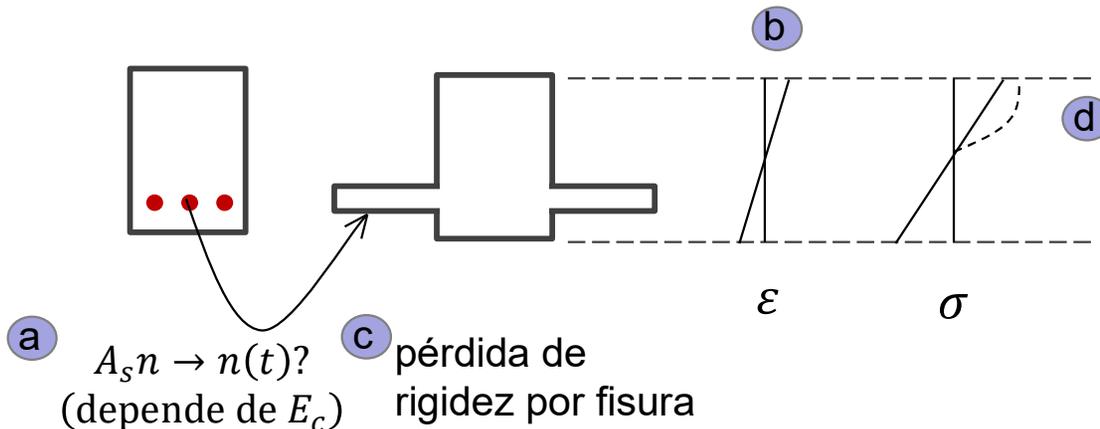
Análisis clásico implica  $M_q(max) \leq M(\sigma_{adm})$



¿admitiendo una sección con una fibra en fluencia?

¿admitiendo una sección con todas las fibras en fluencia (rótula plástica)?

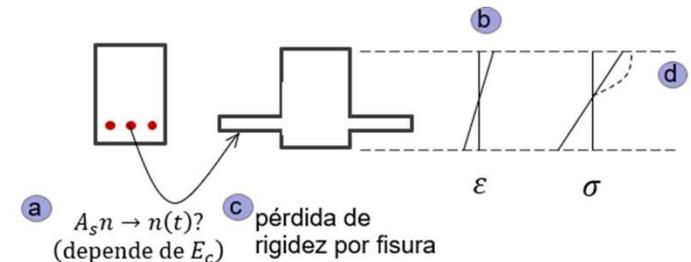
En hormigón, además:



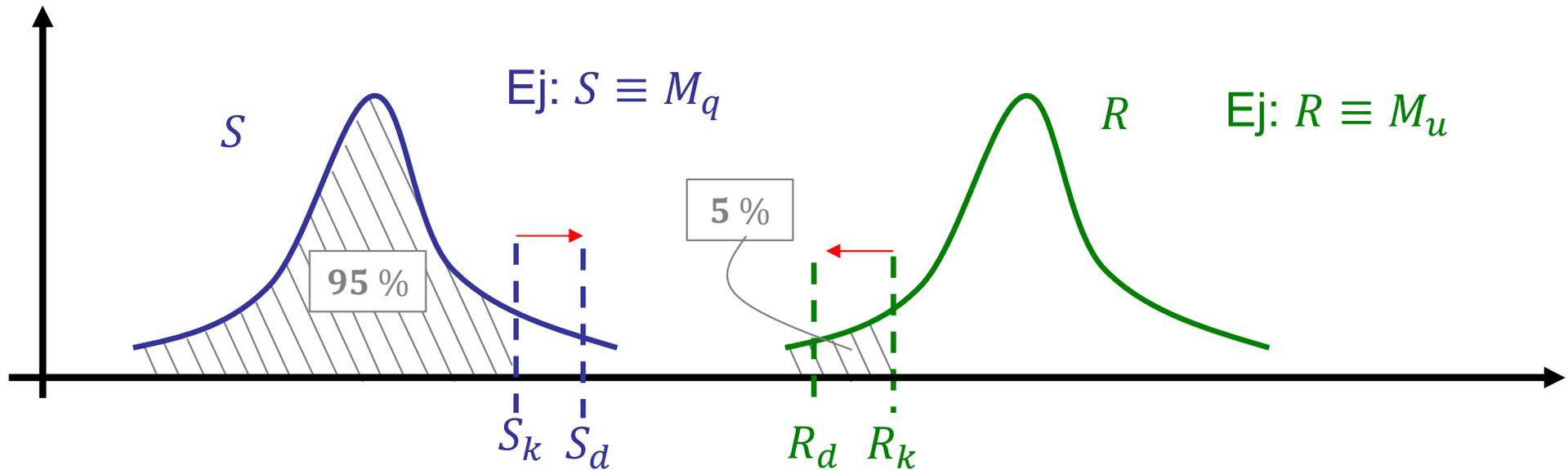
Limitaciones del método clásico (siguiente diapo.)

# Limitaciones del cálculo clásico

- **Hasta ahora, el diseño en cursos anteriores (Resistencia de materiales) se basó en teorías de “cálculo clásico”.**
  - Cargas máximas de servicio ( $q_s$ ) “conocidas”, y con ellas calculamos  $\sigma^{max}$
  - Coeficiente de Seguridad a través de *tensiones admisibles* ( $\sigma^{adm}$ ) en materiales
- **Diseño:**
  - $\sigma^{max} \leq \sigma^{adm}$ ; se puede escribir como:  $M(q) \leq M(\sigma^{adm})$
  - En forma genérica: Solicitaciones ( $S$ )  $\leq$  Respuesta ( $R$ )
- **Limitaciones del método de tensiones admisibles:**
  - Difícil utilizar en hormigón:
    - a) Reología y no linealidad del material (difícil calcular coeficiente de equivalencia:  $n$ )
    - b) Diseño implica tensiones bajas de las armaduras a compresión
    - c) Diseño no tiene en cuenta reducción de rigidez por fisuración
    - d) Tensión-deformación en hormigón no es lineal
  - Consecuencias:
    - i. No se aprovecha toda la capacidad de los materiales
    - ii. Sin información de sobrecarga posible
      - i. *acentuado en estructuras hiperestáticas*



# Ejemplo: diseño en E.L.U. de una viga S.A.



¿probabilidad de falla de la estructura? Estrictamente:  $p_{falla} = p(S > R) \sim 10^{-6}$  (detalles en Eurocodigo 0)

El cálculo estricto, se denomina “nivel 2” e implica calcular  $p_{falla}$  de forma totalmente probabilística. Nosotros usamos el cálculo en nivel 1, un procedimiento semi-probabilista que conduce a resultados suficientemente concordantes al nivel 2.

Se analiza como si la falla se diera cuando la resistencia es menor que una resistencia mínima y al mismo tiempo la sollicitación es mayor que una sollicitación máxima, es decir:

$p_{falla} = p(S > S_{max})p(R < R_{min})$  donde  $R_{min}$  y  $S_{max}$  son la resistencia y solicit. de diseño  $R_d$  y  $S_d$ .

$R_d = R_k / \gamma_m$  y  $S_d = S_k \gamma_f$   $\gamma_f$  y  $\gamma_m$  son los coeficientes de seguridad parcial de las acciones y de los materiales, respectivamente, que se deben determinar para asegurar una probabilidad de fallo máxima aceptada.

¿Hay otras incertidumbres?

- **Valores característicos:**

- **Resistencia característica del material  $f_k$**  : aquella que tiene una probabilidad del 5% de que se presenten valores inferiores a ésta.
- **Valores característico de una acción  $F_k$**  : aquél que tienen una probabilidad del 5% de ser rebasado durante la vida útil de la estructura.

- **Otra filosofía de diseño: “Método de los estados límite”**

- Forma de diseño más moderna, que permite considerar:
  - **Aleatoriedad** de las variables que intervienen en el diseño:
    - *cargas, material, cálculo, geometría, errores constructivos, etc.*
  - **Distintos C.S.** para: cargas, materiales.
- Ajusta los C.S. según las situaciones de cálculo (rotura, deformaciones...).
- Es capaz de aprovechar toda la capacidad de carga de los materiales (plastificación).

- ***Estados Límite son aquellos que la estructura no debe rebasar.***

- **Tres grupos de estados límite:**

- Estados límites últimos (ELU):
  - Capacidad resistente de la estructura (“Que no se rompa”)
  - Ej: Equilibrio, Agotamiento de secciones, Pandeo, Fatiga, Anclaje.
- Estados límites de servicio (ELS) o de utilización:
  - Funcionalidad y estética.
  - Ej.: Deformaciones, fisuración, vibraciones
- Estado límite de durabilidad (ELD):
  - Garantizar una duración mínima (vida útil) de la estructura.

¿En que grupos de estados límite utilizaremos CS mayores?

En este curso nos centraremos en los estados límite últimos

- El objetivo del cálculo es comprobar que la probabilidad de que se alcance un estado límite, durante la vida útil de la estructura, sea inferior a un valor pre-definido.
- Tipos de análisis:
  - Análisis probabilístico completo: es muy complejo (nivel 2), no es posible en la práctica.
  - Se realiza entonces un análisis *semiprobabilístico* (nivel 1), basado en simplificaciones. Es el que se utiliza normalmente en la práctica, y el que utilizamos en el curso.
- Bases del método:
  - Las diversas **causas de error se adjudican a sólo dos de los factores**:
    - Resistencias de los materiales
    - Valores de las acciones
  - Se utilizan en el cálculo valores numéricos únicos (**valores característicos**) para cada factor, asociados a una probabilidad de fallo dada (5%), en vez de funciones de distribución.
  - Se ponderan los valores característicos mediante **coeficientes parciales de seguridad** ( $\gamma$ ), de los materiales ( $\gamma_m$ , específicamente:  $\gamma_c$  para el hormigón y  $\gamma_s$  para el acero) o de las acciones ( $\gamma_f$ ), que **tienen en cuenta las restantes incertidumbres, y reducen la probabilidad de fallo a límites aceptables**.

- **Para considerar la variabilidad de los materiales y las acciones, operaremos con sus valores característicos (ya definidos)**
- **Para tener en cuenta el resto de factores aleatorios, y reducir la probabilidad de fallo, se opera con valores “de diseño” (o “de cálculo”):**
  - Resistencias de diseño (Resistencias minoradas):  $f_d = f_k / \gamma_m$
  - Acciones de diseño (Acciones mayoradas):  $F_d = \gamma_f \times F_k$
- **Con las resistencias de diseño se determina la respuesta de la estructura (R)**
  - En el caso de ELU, se indica normalmente con un subíndice “U” (Ej.:  $M_U, N_U$ ).
- **Con las acciones de diseño se determinan las Solicitaciones de diseño (S).**
  - Se indican normalmente con un subíndice “d” (Ej.:  $M_d, N_d$ ).
- **El diseño y verificación consiste, nuevamente, en asegurarse que las sollicitaciones son menores a la respuesta que es capaz de ejercer la estructura**
  - Solicitaciones ( $S$ )  $\leq$  Respuesta ( $R$ )
    - Ejemplos: ELU (Flexión):  $M_d \leq M_U$ ; ELS (Fisuración):  $w_k \leq w_{max}$  ( $w$ : apertura de fisura)
  - Pero, de esta forma, todas las variables aleatorias son consideradas en el cálculo, y la probabilidad de fallo es reducida hasta valores aceptables.

# Incertidumbres en el cálculo

Factores aleatorios	Principales causas de incertidumbre	Magnitud en la que son tenidos en cuenta
• Resistencia de los materiales	• Variabilidad de los materiales • Defectos de ensayo • Correlación entre probeta y realidad	• Resistencia de cálculo de los materiales
• Valor de las cargas y otras acciones	• Variabilidad de las acciones no permanentes • Variabilidad de pesos propios	• Valor de cálculo de las acciones
• Proceso de cálculo	• Precisión de las hipótesis de cálculo • Errores numéricos (NO de cálculo!) • Grado de rigor	• Valor de cálculo de las acciones
• Características geométricas y mecánicas de la estructura real	• Imperfecciones de ejecución (dimensiones de las secciones, posición de las armaduras, excentricidades adicionales,...)	• Resistencia de cálculo de los materiales • Dimensiones de los elementos y propiedades mecánicas • Valores de cálculo de las acciones
• Otros	• Precisión de las medidas, imperfección en los planos, etc...	• Valores de cálculo de las acciones

**NOTA:** No se consideran errores graves de proyecto, construcción o utilización (Ejemplo, colocar la armadura en el lado comprimido)

# Balcón en Buenos Aires

1<sup>er</sup> Semestre 2024 Agustin Spalvier Curso: Hormigón Estructural 1

11



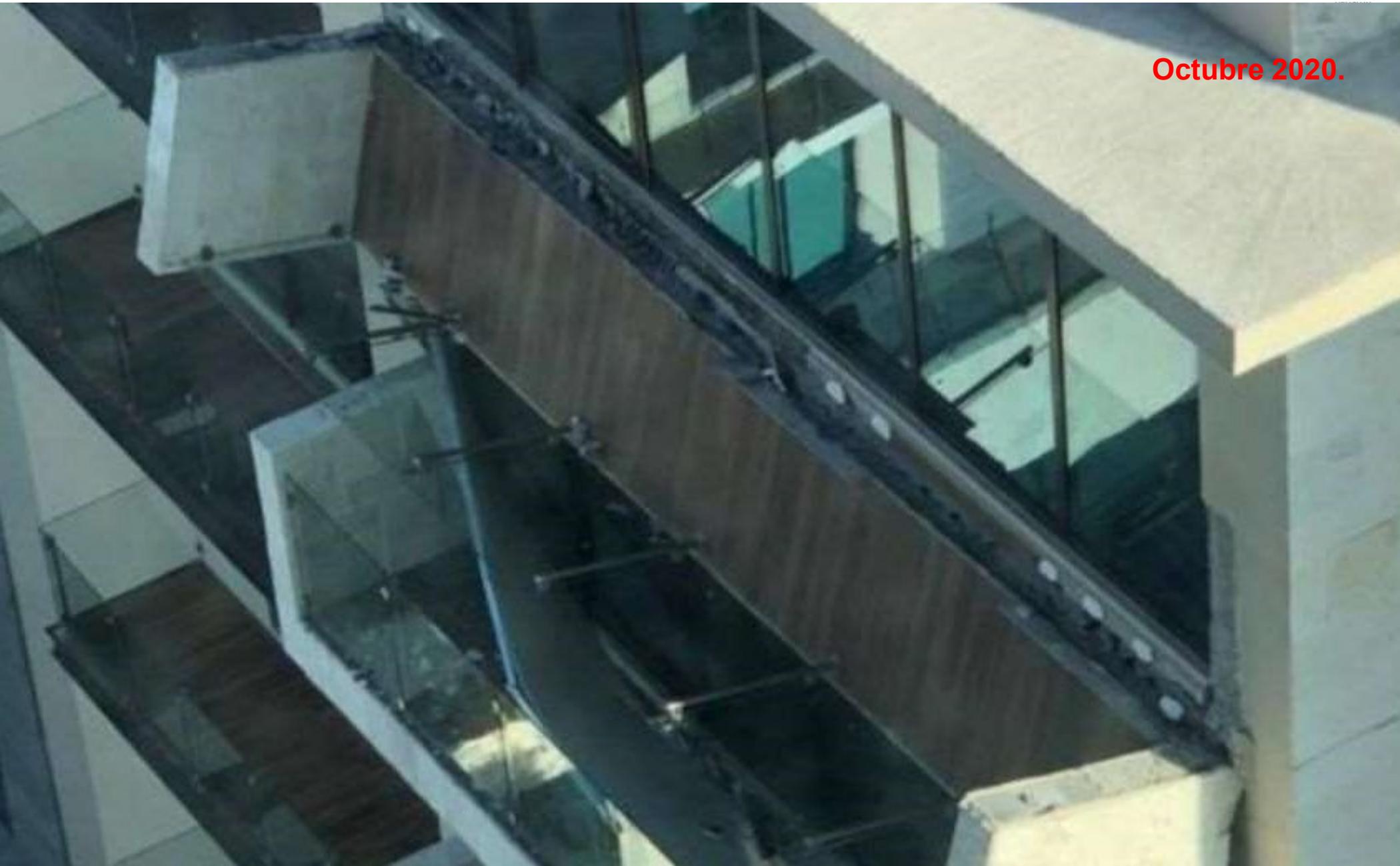
# Balcón en San Pedro, Nuevo León, México

1<sup>er</sup> Semestre 2024 Agustin Spalvier Curso: Hormigón Estructural 1

12

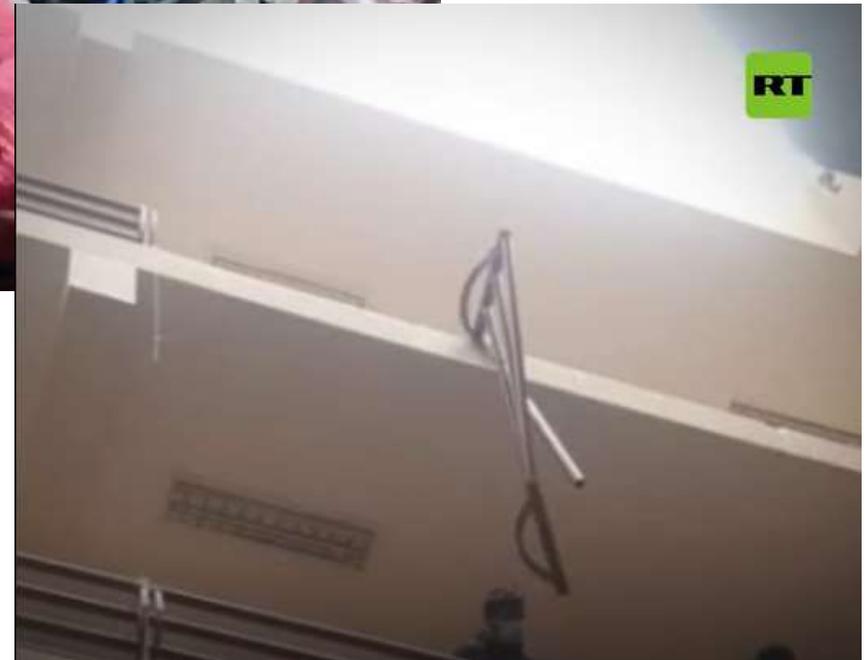


Octubre 2020.



# El Alto, Bolivia

Marzo 2021



# Descenso del Puente de la Barra PdeE

1er Semestre 2024 Agustin Spalvier Curso: Hormigón Estructural 1

2022



## • Valores de referencia de la probabilidad de fallo ( $P_f$ )

– La probabilidad de que se alcance el fallo en un edificio ordinario (vivienda) por superar un **Estado Límite Último** sería del orden de  $10^{-6}$ .

– Para un estado **Límite de Servicio** (ej.: fisura de ancho superior al máximo permitido para el ambiente de exposición) para el mismo edificio podría ser del orden de  $10^{-4}$ .

– Una vez fijada la  $P_f$ , mediante procedimientos matemáticos, se pueden determinar los coeficiente parciales de seguridad  $\gamma_m$  y  $\gamma_f$ .

– **En las normativas nacionales ya están tabulados:**

Número medio de personas en peligro	Consecuencias económicas en caso de fallo		
	Sin gravedad	Graves	Muy graves
Pequeño (<0,1)	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Medio	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
Grande (>10)	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$

$\gamma_m$	ELU
Acero ( $\gamma_s$ )	1.15
Hormigón ( $\gamma_c$ )	1.5

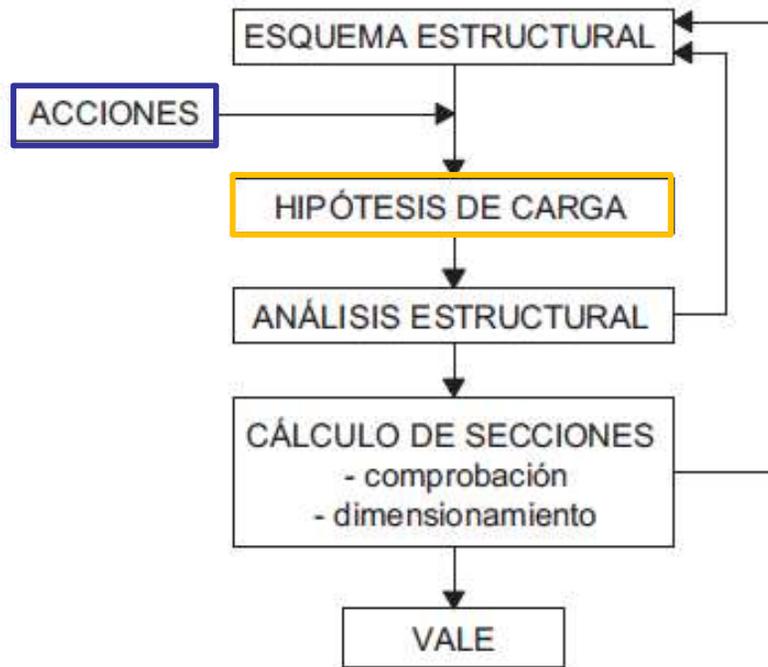
$\gamma_f$	ELU (UNIT)	ELU (EHE)
Cargas permanentes ( $\gamma_{fg}$ )	1.6	1.35
Cargas variables ( $\gamma_{fq}$ )	1.6	1.5

¿Porqué las diferencias?

En este curso utilizaremos los valores de la EHE

– Para los ELS  $\gamma_c = \gamma_s = 1.0$ , (se utilizará en Hormigón 2)

# Acciones e hipótesis de carga



**Acción:** Cualquier causa capaz de producir o modificar estados tensionales

Consideración de todas las *acciones* que pueden actuar sobre la estructura

*Determinación de las hipótesis de carga, que son las diferentes combinaciones posibles de las acciones (no incompatibles entre si) que debe soportar la estructura, y que deben elegirse de forma que se produzcan en ella los efectos mas desfavorables.*

- **Situaciones de la estructura:**

- Persistente: Uso normal
- Transitoria: Construcción o reparación. La estructura no está en uso
- Accidentales: Condiciones excepcionales. (ej.: choque contra una baranda en un puente)
- Sísmicas

– Los Coef. de Seg. y las hipótesis de carga varían en cada situación.

- **En cada situación, se deben analizar diferentes combinaciones de las acciones**

– Se busca encontrar la combinación más desfavorable (“hipótesis”) para cada verificación.

– En cada combinación:

- Acción principal (Acción variable determinante)
- Acciones que pueden suceder simultáneamente (Acciones variables concomitantes o de acompañamiento)

- **Dependiendo de la combinación, las acciones adoptan distintos valores representativos.**

a) Valor característico (poco frecuente, raro, o poco probable):  $F_k$

b) Valor de combinación:  $\psi_0 \cdot F_k$

c) Valor frecuente:  $\psi_1 \cdot F_k$

d) Valor cuasipermanente:  $\psi_2 \cdot F_k$

Para la verificación de ELS:

Esta nomenclatura ( sin ser (b) ) se usa para definir las combinaciones cuya acción determinante adopta el *valor característico* (poco frecuente), el *frecuente*, o el *cuasipermanente*.

# Combinaciones de acciones – caso general

## • Combinaciones de acciones a considerar en ELU (EHE: Art. 13)

— Situaciones **persistentes** o transitorias:

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

— Situaciones accidentales:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G_{k,j}^* + \gamma_P P_k + \gamma_A A_k + \gamma_{Q,1} \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

# Coeficientes de seguridad y simultaneidad

**Tabla 12.1.a**

Coeficientes parciales de seguridad para las acciones, aplicables para la evaluación de los Estados Límite Últimos

¿Este mismo cuadro para ELS?

Tipo de acción	Situación persistente o transitoria		Situación accidental	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Pretensado	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$
Permanente de valor no constante	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,50$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
Accidental	—	—	$\gamma_A = 1,00$	$\gamma_A = 1,00$

Ejemplos de *Coeficientes de simultaneidad*, según el CTE (España). (Hay más)

	$\Psi_0$ COMBINACIÓN	$\Psi_1$ FRECUENTE	$\Psi_2$ CASI PERMANENTE
<b>Sobrecarga superficial de uso</b>			
Zonas residenciales (Categoría <b>A</b> )	0,7	0,5	0,3
Zonas administrativas (Categoría <b>B</b> )	0,7	0,5	0,3
Zonas destinadas al público (Categoría <b>C</b> )	0,7	0,7	0,6
Zonas comerciales (Categoría <b>D</b> )	0,7	0,7	0,6
Viento	0,6	0,5	0

- **En el caso particular de estructuras de edificación ordinarias, las combinaciones pueden simplificarse.**

– Estados Límites Últimos en situaciones persistentes o transitorias:

- cuando actúa únicamente una acción variable  $Q_k$ :

$$F_d = \sum \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$$

**Es como trabajaremos en Hormigón 1.  
(En Hormigón 2 se profundizará este tema.)**

- y cuando actúan dos o más acciones variables:

$$F_d = \sum \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + \sum \Psi_{0,Q_i} \gamma_{Q,i} \cdot Q_i$$

Carga variable determinante

Carga variable concomitante

Factor de simultaneidad “de combinación” (0,7 o 0,6)

- **En este curso trabajaremos con el “Método de los Estados Límite”**

- Se toma la **resistencia característica de los materiales  $f_k$** , asociada a una probabilidad del 5% de que se presenten valores inferiores a ésta.
- Se toman los **valores característicos de las acciones  $F_k$** , como aquéllos que tienen una probabilidad del 5% de ser rebasados durante la vida útil.

- **En los cálculos (de acuerdo a EHE) trabajaremos con:**

- Resistencias de diseño (Resistencias minoradas) de los materiales:  $f_d = f_k / \gamma_m$

C.S. Acero ( $\gamma_s$ )

1.15

C.S. Hormigón ( $\gamma_c$ )

1.5

- Acciones de diseño (Acciones mayoradas):  $F_d = \Sigma \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k$

C.S. Cargas permanentes ( $\gamma_{fg}$ )

1.35

C.S. Cargas variables ( $\gamma_{fq}$ )

1.5

- Es importante **indicar siempre** si estamos hablando de esfuerzos o resistencias **características o de diseño**.

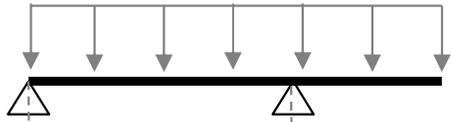
- **La verificación en ELU consiste en comprobar:**

- que las solicitaciones de diseño (calculadas con las acciones de diseño) son menores o iguales a las solicitaciones últimas (calculadas con las resistencias de diseño):

- Ej.: Para el momento flector:  $M_d \leq M_U$

# Ejemplo teórico: viga con voladizo

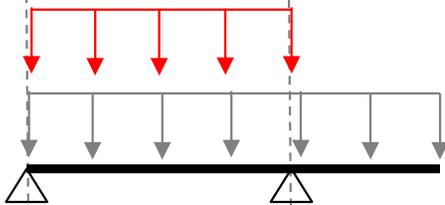
## Esquema estructural



M de  
cada  
acción



M de comb.  
1 y 2



M de  
comb. 3

## Acciones

- **Peso propio:**  $G_{k,PP}$
- **Cargas muertas:**  $G_{k,CM}$
- **Sobrecarga de uso:**  $Q_{k,SCU}$

Pensando las combinaciones  
(estructura final: **Situación  
Persistente en ELU**)

1.  $PP + CM$
2.  $PP + CM + SCU$

## Comb. para diseñar el $M^+$ :

1.  $1,35(PP + CM)$
2.  $1,35(PP + CM) + 1,5 SCU$
3.  $1,35(PP + CM) + 1,5 SCU$

La combinación más desfavorable (es decir, la hipótesis de carga) para  $M^+$  es la combinación 3.

¿Hay alguna acción que genere efectos favorables en  $M^+$ ? ¿qué pasa si colocamos SCU sobre el voladizo solamente?

Pensar cuál es la hipótesis de carga para diseñar  $M^-$ .

# Ejemplo teórico: pórtico de una casa

## Esquema estructural

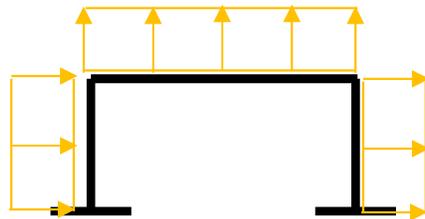
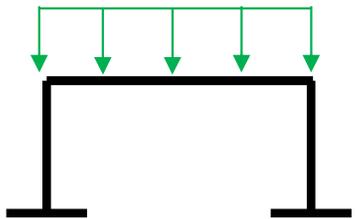
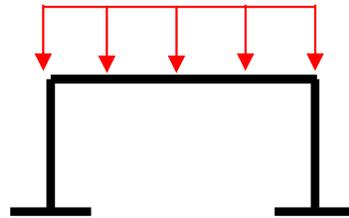
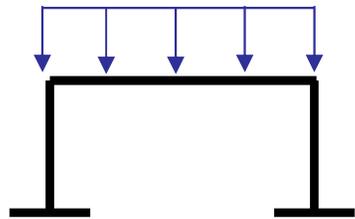


## Acciones

- **Peso propio:**  $G_{k,PP}$
- **Cargas muertas:**  $G_{k,CM}$
- **Sobrecarga de uso:**  $Q_{k,SCU}$
- **Viento:**  $Q_{k,V}$

## Pensando las combinaciones (estructura final: Situación Persistente en ELU)

1.  $PP + CM$
2.  $PP + CM + SCU$
3.  $PP + CM + V$
4.  $PP + CM + SCU + V$



## Combinaciones:

- 1:  $1,35 \cdot (PP + CM)$
- 2:  $1,35 \cdot (PP + CM) + 1,5 \cdot SCU$
- 3:  $1,35 \cdot (PP + CM) + 1,5 \cdot V$
- 4a:  $1,35 \cdot (PP + CM) + 1,5 \cdot (SCU + 0,6 \cdot V)$
- 4b:  $1,35 \cdot (PP + CM) + 1,5 \cdot (0,7 \cdot SCU + V)$

$\gamma_{fG} = 1,00$  implican cinco comb. más.

$\gamma_{fQ} = 0$  ya está considerado en comb. 1.

Tengo 10 comb. ¿Cuáles son las Hip. de Carga (= combinaciones más desfavorables)?

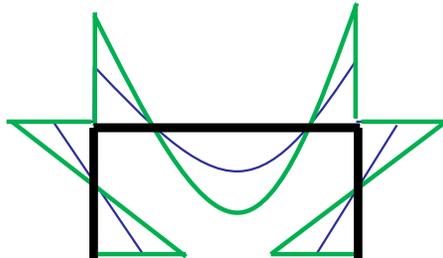
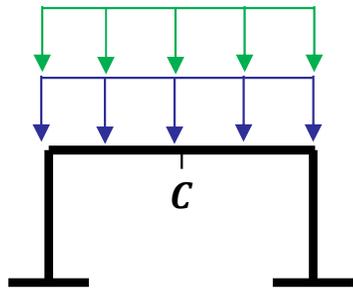
Para responder, ¿debo calcular la estructura 10 veces? ¡NO!

Puedo estudiar cómo funciona la estructura y descartar combinaciones según qué verificación esté realizando.

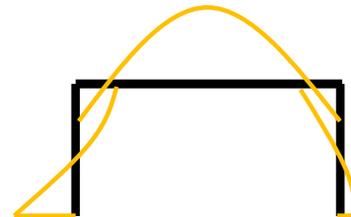
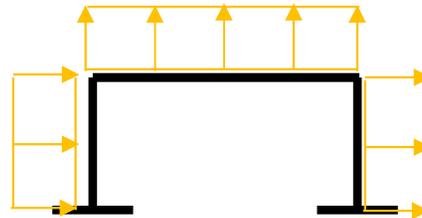
# Ejemplo teórico: pórtico de una casa

Peso propio:  $G_{k,PP}$

+ CM o SCU



Viento:  $Q_{k,V}$



Para diseñar  $M_C$  ELU en viga  
Combinaciones:

~~1:  $1,35 \cdot (PP + CM)$~~

2:  $1,35 \cdot (PP + CM) + 1,5 \cdot SCU$

~~3a:  $1,35(PP + CM) + 1,5 \cdot V$~~

3b:  $1,0 \cdot (PP + CM) + 1,5 \cdot V$

~~4a:  $1,35(PP + CM) + 1,5 \cdot (SCU + 0,6 \cdot V)$~~

~~4b:  $1,35(PP + CM) + 1,5 \cdot (0,7 \cdot SCU + V)$~~

¿debo considerar  $\gamma_{fG} = 1,00$ ?

Con las combinaciones 2 y 3b (que son las potencialmente más desfavorables) se puede construir la envolvente del diagrama de momentos

¿para diseñar pilar que combinaciones son las más desfavorables?  
¿basta con solo considerar el Momento Flector?