

# LA VARIABLE TIEMPO EN EL CÁLCULO DE ACCIONES PARA ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN.

<sup>1</sup>Tomás Cabrera; <sup>2</sup>Mariano de las Heras; <sup>3</sup>Carolina Cabrera

<sup>1</sup> Departamento 5420, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid

<sup>2</sup> Departamento 5405, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid

<sup>3</sup> Alumno Fin de Carrera, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid

**Palabras Clave:** Tiempo, acciones, estructuras, edificación.

## Resumen

Desde la publicación en 2006 del Código Técnico de la Edificación (CTE) [1], para los Estados Límite Últimos (ELU), la seguridad en la evaluación de las acciones que actúan sobre las estructuras de edificación se debe realizar siguiendo las directrices marcadas en Eurocódigos Estructurales [2].

La adopción de una normativa internacional de unificación en el cálculo estructural tiene gran importancia a nivel práctico y profesional.

Así por ejemplo, para un egresado hispano, que se traslade a otro país adscrito al Comité Europeo de Normalización (CEN) con el deseo de dedicarse al cálculo de estructuras, en principio, debe ser suficiente informarse sobre el Anexo Nacional, del país en que se encuentre. La parte general de la normativa de cálculo para los Estados miembros del CEN está constituida por los Eurocódigos Estructurales.

La idea de que un edificio y consecuentemente su estructura es para toda la vida, es decir sin límite temporal en comparación con la duración de la vida del ser humano, ha dejado de ser un referente. CTE establece que la vida útil de una estructura, normal o estándar, de edificación será de 50 años.

En general la introducción de la seguridad en las acciones sobre una estructura de edificación se consigue, multiplicando sus valores representativos por coeficientes de seguridad parciales "γ" y coeficientes "ψ".

Las situaciones de cálculo contempladas por CTE y los Eurocódigos, son tres:

a/ Permanentes o transitorias. b/ Accidentales. y c/ Sísmicas.

Sobre las dos últimas se ha escrito mucho en el campo científico y técnico, de la primera sólo existe en nuestra legislación, hasta el momento, una distinción a nivel semántico.

Si se introduce la variable tiempo en estructurales provisionales, como por ejemplo en un andamio, un apeo o un apuntalamiento con una vida útil  $\leq 10$  años (tabla 1), parece evidente que puedan utilizarse valores distintos en las acciones de los utilizados para un edificio normal con vida útil estándar de 50 años o para un edificio monumental con 100 años de vida útil.



Fig. 1: Territorio continental de los Estados miembros de la Unión Europea.

Tabla 1: Vida útil de las estructuras según EN-1990.

	Tipo de estructura	Vida útil (años)
1	Provisionales	10
2	Partes reemplazables	10 -50
3	Agrícolas	15-30
4	Edificios comunes	50
5	Edificio monumental	100

## 1.- Introducción

El presente estudio profundiza en los valores las acciones que actúan sobre una estructura conforme a la vida útil para la que se proyecta inicialmente, especialmente cuando su vida útil es menor del valor estándar. Esto sucede, frecuentemente, en el campo de la rehabilitación. Además todo ello debe conseguirse sin merma de la seguridad pactada.

La metodología de este trabajo sigue, en todo momento, las directrices y formulaciones dadas en los distintos Eurocódigos Estructurales y no incorporados, hasta el momento, en CTE. Se analiza por separado la importancia cuantitativa entre las acciones permanentes y de las diferentes acciones variables climáticas que actúan sobre la estructura de una edificación.

## 2.- La vida útil de una estructura de edificación en CTE.

El Código Técnico de la Edificación [1], establece en 50 años la duración útil estándar, es decir, el periodo de servicio normal de una estructura de edificación. También indica que si el periodo de servicio previsto para un proyecto difiere de éste valor estándar, se indicará su duración prevista en las bases de cálculo y en su caso, en el correspondiente anejo de cálculo.

Parece, entonces, que no se deben utilizar los mismos valores de cálculo en la evaluación de las acciones para una estructura provisional como un apeo o apuntalamiento (vida útil  $\leq 10$  años), que para un edificio normal (50 años).

## 3.- Combinación de las acciones.

Para Estados Límite Último (ELU) el CTE establece la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * G_{k,j} + \gamma_P * P + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (1)$$

$\gamma_{G,j}$  es el coeficiente de seguridad para las acciones permanentes,  $\gamma_P$  el coeficiente de seguridad para la acción del pretensado, si existe,  $\gamma_{Q,1}$  el coeficiente de seguridad para la acción variable determinante y  $\gamma_{Q,i}$  el correspondiente a las acciones variables concomitantes (de acompañamiento a la determinante).

$G_k$  es el valor característico de cada acción permanente,  $P$  el valor característico de la acción del pretensado,  $Q_k$  el valor característico de cada acción variable y  $\psi_{0,i}$  los coeficientes de combinación (simultaneidad) para las acciones variables concomitantes (todos definidos adecuadamente en CTE).

Cuando la duración de una estructura difiere del valor estándar, cabe actuar de manera unitaria siguiendo una de estas opciones:

- 1/ Definir distintos coeficientes de seguridad parciales  $\gamma$  según la vida útil.
- 2/ Definir distintos coeficientes de combinación  $\psi_{0,i}$  según la vida útil.
- 3/ Distinguir distintos valores característicos de las acciones según la vida útil.

El Eurocódigo se define por esta última y por ello es la guía de este estudio.

#### 4.- La seguridad pactada en las estructuras. (UNE-EN1900).

En el cálculo estructural y para los distintos estados límites se identifican tres niveles a los que referir la seguridad de las estructuras, estos niveles son:

-Nivel I: Métodos semiprobabilísticos. Se cubren mediante la definición, en un código estructural, de los valores característicos de las acciones.

Los métodos probabilísticos pueden subdividirse en dos clases:

-Nivel II: Métodos de fiabilidad de primer orden denominados FORM. Estos métodos hacen uso de ciertas aproximaciones bien definidas y conducen a resultados que en la mayoría de aplicaciones estructurales pueden considerarse como suficientemente precisos.

- Nivel III. Métodos totalmente probabilísticos (cálculo probabilístico exacto). Los métodos de nivel III se usan poco en la calibración de los códigos de cálculo debido a la importante escasez de datos estadísticos fiables.

##### 4.1.- El índice de fiabilidad $\beta$ .

En los procedimientos de nivel II se define convencionalmente una medida de la fiabilidad mediante el denominado índice de fiabilidad " $\beta$ ".

Índice que EN 1990 relaciona con la probabilidad de fallo "Pf" mediante la función de distribución acumulada de la función de distribución normal " $\Phi$ ". Incorporando, ahora, la vida útil se obtienen los valores de *Tabla 2*.

Tabla 2: Probabilidad de fallo,  $\beta$ , tiempo de vida útil.

Pf = $\Phi^{-1}(-\beta)$	$\beta$	Vida útil (años)
$1,4 \cdot 10^{-6}$	4,7	1
$7,2 \cdot 10^{-6}$	4,3	5
$1,4 \cdot 10^{-5}$	4,2	10
$3,6 \cdot 10^{-5}$	4,0	25
<b><math>7,2 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b>3,8</b>	<b>50</b>
$1,4 \cdot 10^{-4}$	3,6	100

#### 5.- Calibración de los valores característicos de cálculo de las acciones.

EN-1990 (Anexo C.7), indica las funciones de distribución recomendadas para modificar el valor característico de la acción definida en un código, como CTE.

##### 5.1.- Calibración de los valores característicos en acciones permanentes.

Consideramos una acción permanente por ejemplo un peso propio G que sigue una distribución normal. Para este caso se indica la fórmula:

$$G = \mu - \alpha * \beta * \sigma \quad (2)$$

Cuando se emplea en la verificación de la fiabilidad de una estructura un periodo de tiempo alternativo  $T_a$  en vez de la vida útil estipulada  $T_d$ , entonces el valor de cálculo G debe determinarse mediante  $T_a$  en lugar de  $T_d$ . El valor característico  $G_k$  de G se define, para una acción permanente, como su valor medio  $\mu_G$ , es decir:

$$G_k = \mu_G \quad (3)$$

El valor de cálculo  $G_d$  viene dado por la expresión:

$$G_d = \mu_G - \alpha_G * \beta * \sigma_G = \mu_G - (-0,7) * \beta * \sigma_G = \mu_G * [1 + 0,7 * \beta * V_G] = G_k * [\gamma_G] \quad (4)$$

Donde:  $\mu_G$  es la media.  $\sigma_G$  la desviación típica.  $V_G$  el coeficiente de variación (en estadística, el coeficiente de variación se define como  $V = \sigma/\mu$ ).

$\alpha_G = -0,7$  es el coeficiente de sensibilidad de G en el método FORM.

El coeficiente parcial de seguridad de G se define por:  $\gamma_G = G_d / G_k$  (5)

Luego de las expresiones (ec.4) y (ec.5) se tiene:  $\gamma_G = 1 + 0,7 * \beta * V_G$  (6)

Con  $\beta = 3,8$  y con un coeficiente de variación para acciones permanentes usual  $V_G = 0,1$ , entonces tenemos:  $\gamma_G = 1 + (0,7 * 3,8 * 0,1) = 1,266$  (7)

EN-1990 incrementa la seguridad aproximadamente, un 5% para considerar la posible incertidumbre del modelo, entonces:  $\gamma_G = 1,05 * 1,266 = 1,33 \approx 1,35$  (8)

Que resulta el valor recomendado en EN-1990 y CTE

Con  $\beta = 4,2$  (10 años):  $\gamma_G = 1,05 * (1 + 0,7 * 4,2 * 0,1) = 1,36 \nless 1,35$  (9)

En consecuencia no se puede reducir el valor de la acciones permanentes.

## 5.2.- Coeficientes parciales para las acciones climáticas.

Las acciones climáticas para un periodo de referencia (retorno) más breve que el estándar de 50 años si pueden reducirse sin merma de la seguridad.

### 5.2.1.- Acción climática de la nieve.

De conformidad con EN 1991-1-3 Cargas de nieve, en el Anexo D, se indica que el valor característico de la acción de la nieve  $s_{k,n}$  para un periodo de retorno de "n" años viene dado por:

$$s_n = X * s_k, \quad \text{donde: } X = \frac{1 - V \frac{\sqrt{6}}{\pi} [\ln(-\ln(1-p)) + 0,57722]}{1 + 2,5923V} \quad (10)$$

$s_k$ , valor característico carga de nieve para un periodo de retorno de 50 años.

$s_n$ , es el valor de la carga de nieve para un periodo de retorno de "n" años.

$p$  es la probabilidad de excedencia anual. Equivale, aproximadamente, para probabilidades muy pequeñas a  $1/n$ . Donde n es el correspondiente periodo de retorno en años. (Por ejemplo para  $n = 50$  años, entonces  $1/n = 0,02$  y en consecuencia  $p = 0,02$ ).

$V$ , es el coeficiente de variación para la carga máxima anual de la nieve. (Se ha tomado  $V = 0,2$  para los ejemplos de comparación de la Tabla 3).

### 5.2.2.- Acción climática del viento.

EN 1991-1-4 Acciones de viento, indica que la velocidad del viento básica  $v_{b,n}$  para un periodo de retorno de "n" años [no confundir con el superíndice n de la formula (11)] puede determinarse utilizando la formulación:

$$v_{b,n} = c_{prob} * v_{b,50}, \quad \text{donde: } c_{prob} = X = \left[ \frac{1 - K \ln(-\ln(1-p))}{1 - K \ln(-\ln(0,98))} \right]^n \quad (11)$$

$v_{b,50}$  es la velocidad básica del viento para un periodo de retorno de 50 años. (Velocidad media de viento durante 10 min. con una probabilidad anual de ser excedido de 0,02, es decir  $p = 0,02$ ).

$v_{b,n}$  para un periodo de retorno de "n" años, p es la probabilidad de que  $v_{b,n}$  sea sobrepasado para ese periodo de retorno de "n" años.

Según EN-19991-1-4: Los valores de K se pueden proporcionar en un anexo nacional. (Los valores recomendados por la norma son:  $K = 0,2$  y  $n = 0,5$ ).

Para los ejemplos de comparación (Tabla 3), se emplea consecuentemente:  $K = 0,2$  (correspondiente al coeficiente de variación  $V_v = 0,26$ ) y  $n = 0,5$ .

### 5.2.3- Acción climática de la temperatura.

De conformidad EN 1991-1-5 Acciones Térmicas en el Anexo A indica que las temperaturas a la sombra máximas y mínimas del aire  $T_{max} / T_{min}$ , para un periodo de retorno de 50 años. Para distinto periodo de retorno de "n" años:

$$T_{max,p} = X * T_{max}, \quad \text{para } X = \{k_1 - k_2 \ln [- \ln (1 - p)]\} \quad (12)$$

$$T_{min,p} = X * T_{min}, \quad \text{para } X = \{k_3 + k_4 \ln [- \ln (1 - p)]\} \quad (13)$$

En donde: la expresión (ec. 13) solo puede utilizarse si  $T_{min}$  es negativa.

$T_{max,p} / T_{min,p}$  es el máximo/mínimo de la temperatura del aire a la sombra para una probabilidad anual de ser excedidos "p" diferente de 0,02.

Los coeficientes recomendados por EN-1991-1-5 son:

$$k_1 = 0,781, k_2 = 0,056, k_3 = 0,393,$$

$$k_4 = -0,156 \text{ (en base a datos de U.K.)}$$

p es la probabilidad anual de ser excedido para periodo de retorno de n años.

El resumen de los coeficientes de reducción X para las acciones climáticas (aplicados de modo:  $Q_{k,n} = X * Q_{k,50}$  para los diferentes periodos de retorno) se resumen en Tabla 3:

Tabla 3: Coeficientes "X" de reducción para acciones climáticas  $Q_{k,n} = X * Q_{k,50}$

Retorno (años)	5	10	25	50	100	
p	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	
X =	Sn	0,75	0,83	0,93	1	1,07
	Vb,n	0,85	0,90	0,96	1	1,04
	Tmax,p	0,86	0,91	0,96	1	1,04
	Tmin,p	0,63	0,74	0,89	1	1,11

### 6.- Ejemplo práctico.

Apeo de forjado unidireccional de cubierta con dimensiones  $5 \times 8 \text{ m}^2$  mediante un pórtico central de nudos rígidos ( $L = 8\text{m}$ ) en el centro del forjado.

Zona de influencia de carga de la viga central  $\frac{1}{2}$  Luz forjado = 2, 5m.

Acción permanente (carga muerta):

$$\text{peso propio forjado} = 3 \text{ kN. /m}^2 \text{ (300 kp. /m}^2\text{)}$$

$$\text{peso propio cubierta} = 2 \text{ kN. /m}^2 \text{ (100 kp. /m}^2\text{)}$$

$$\text{Total permanente} = 5 \text{ kN. /m}^2 \text{ (500 kp. /m}^2\text{)} \rightarrow 5 \text{ kN. /m}^2 \times 2,5 \text{ m} = 12,5 \text{ kN./m}$$

Acciones variables = nieve (o sobrecarga de conservación) + viento.

$$\text{Sobrecarga nieve} = 1 \text{ kN. /m}^2 \text{ (100 kp. /m}^2\text{)} \rightarrow 1 \text{ kN. /m}^2 \times 2,5 \text{ m} = 2,5 \text{ kN./m}$$

Viento: acción puntual a nivel de forjado = 10 kN. (1000 kp.) se considera zona de influencia de  $2,5 \times 4 = 10\text{m}^2$  y presión de viento:  $q = 1 \text{ kN./m}^2$  (100 kp./m<sup>2</sup>).

En la figura 2 se muestran las hipótesis simples de cálculo.

En la figura 3 se resumen los momentos en extremos de barra para cada una de las hipótesis simples.

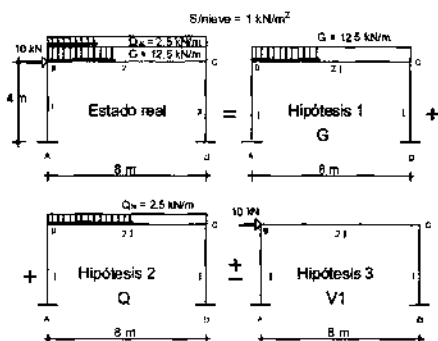


Fig. 2: Esquema de acciones sobre la estructura con las hipótesis simples de cálculo.

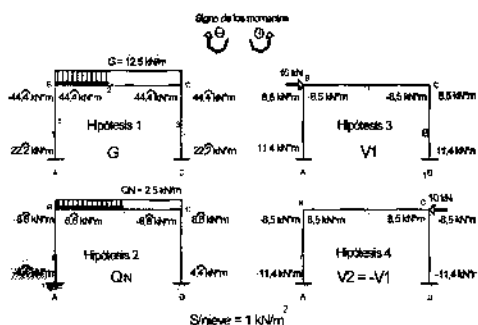


Fig. 3: Momentos en extremo de barra para cada una de las hipótesis simples de cálculo.

## 6.1.- Comparación de resultados del ejemplo práctico.

El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a un ELU y para situación persistente o transitoria se determina mediante la oportuna combinación de acciones. El resultado es la envolvente segura de todas las combinaciones.

El ejemplo se realizó con las ocho combinaciones usuales que se obtienen de las hipótesis simples junto a la simplificación de simetría.

Tabla 4: comparación de resultados globales. Valores máximos para  $G + QN \pm V$

Resultado CTE (sin reducción de valores para la acción climática). Momento Flector en $kN \cdot m$				
Viga pórtico			Pilares	
E. dorsal	Centro	E. frontal	Cabeza	Pie
80,98	91,66	80,98	80,98	50,43
Resultado Eurocódigo para vida útil = 10 años. Momento Flector en $kN \cdot m$				
Viga pórtico			Pilares	
E. dorsal	Centro	E. frontal	Cabeza	Pie
77,95	88,84	77,95	77,95	48,15

## 7.- Conclusiones

1ª.- El valor característico de la acción permanente en estructuras provisionales de edificación no puede reducirse a pesar de tener una duración < 50 años.

2ª.- El valor característico para las acciones climáticas se puede reducirse cuando se acorta la vida útil estructural estándar (vida útil < 50 años).

3ª.- En el ejemplo propuesto el ahorro en el esfuerzo momento flector ha sido del 3,1% en la viga del pórtico y del 3,7% en los pilares.

4ª.- Para sobrecargas de uso dada la incertidumbre del periodo de retorno y la falta de datos estadísticos no se puede, por el momento, reducir las acciones.

## REFERENCIAS

[1] Ministerio de Fomento: "Código Técnico de la edificación". (2006). Ed. M F, Madrid.

[2] Eurocódigos estructurales:

UNE-EN 1990: Eurocódigos. "Bases de cálculo de estructuras". (2003). UNE-EN 1991-1-3: "Eurocódigo 1. Cargas de Nieve" (2004). UNE-EN 1991-1-4: "Eurocódigo 1. Acciones de viento". (2007). UNE-EN 1991-1-5: "Eurocódigo 1. Acciones térmicas". (2004). Ed. AENOR. Madrid.