

# Notación

## Mayúsculas latinas

$A$	Área
$A_c$	Área de hormigón
$A_s$	Área de acero
$E$	Módulo de deformación
$E_a$	Módulo de deformación del acero estructural
$E_c$	Módulo de deformación del hormigón
$E_{cm}$	Módulo de deformación medio del hormigón
$E_p$	Módulo de deformación del acero de pretensar
$E_s$	Módulo de deformación del acero
$I$	Inercia de la sección respecto al eje horizontal “x”
$K$	Coefficiente de reducción por efecto del esfuerzo axil
$M$	Momento
$M_{fis}$	Momento de fisuración
$M_u$	Momento último de agotamiento
$N$	Axil
$N_0$	Axil último centrado sin momento flector
$N_u$	Axil último de agotamiento
$N_{ext}$	Axil externo aplicado en el centro de gravedad
$N_d$	Axil de cálculo
$P_k$	Valor característico de la fuerza de pretensado
$P_{k\infty}$	Valor característico de la fuerza de pretensado a tiempo infinito
$T$	Temperatura
$V_u$	Cortante último de agotamiento
$V_{u1}$	Cortante de agotamiento por compresión oblicua en el alma
$V_{u2}$	Cortante de agotamiento por tracción en el alma
$V_{cu}$	Contribución del hormigón a la resistencia frente a cortante
$V_{su}$	Contribución de la armadura transversal al cortante de último
$W$	Módulo resistente a flexión de la sección
$W_h$	Módulo resistente a flexión de la sección homogénea

## Minúsculas latinas

$b$	Ancho de la pieza
$\gamma_1$	Coefficiente de corrección para el axil último en <i>HAR</i>
$\gamma_2$	Coefficiente de corrección para el momento último en <i>HAR</i>
$d$	Canto útil de la sección
$e$	Excentricidad del pretensado
$f_{ad}$	Límite elástico de cálculo del acero estructural
$f_c$	Resistencia a compresión del hormigón
$f_{cm}$	Resistencia media a compresión del hormigón
$f_{ck}$	Resistencia característica a compresión del hormigón
$f_{ctm}$	Resistencia media a tracción del hormigón

$f_{ptk}$	Límite elástico del acero de pretensar
$f_{pu}$	Resistencia a tracción del acero de pretensar
$f_y$	Límite elástico del acero
$f_{yd}$	Límite elástico de cálculo del acero
$f_{1cd}$	Resistencia a compresión de la biela de hormigón
$h$	Canto
$j$	Coefficiente de análisis seccional del método de las $j$ 's
$k_2$	Coefficiente de rigidización del EC-2
$l_{s,max}$	Separación máxima entre fisuras
$n$	Grado del polinomio de la ecuación en rotura del hormigón
$s_m$	Separación media entre fisuras
$t$	Tiempo de evaluación
$t_0$	Tiempo inicial
$t_s$	Tiempo de inicio de la retracción efectiva
$w_k$	Apertura característica de fisura
$w_m$	Apertura media de fisura
$w_{max}$	Apertura máxima de fisura
$x$	Profundidad de la fibra neutra
$y$	Altura de la fibra de análisis
$z$	Brazo mecánico

## Mayúsculas griegas

$\Delta$	Incremento
$\Omega$	Cociente de pérdidas de pretensado por relajación

## Mayúsculas griegas

$\alpha$	Coefficiente de dilatación lineal del material
$\alpha_1$	Relación tensión bloque rectangular y resistencia hormigón
$\beta$	Coefficiente de relación apertura media – apertura característica
$\beta_1$	Razón entre profundidad del bloque y profundidad del eje neutro
$\chi$	Coefficiente de envejecimiento
$\chi_r$	Coefficiente de relajación
$\varepsilon$	Deformación unitaria
$\varepsilon_0$	Deformación inicial
$\varepsilon_a$	Deformación por envejecimiento del hormigón
$\varepsilon_c$	Deformación del hormigón
$\varepsilon_{cu}$	Deformación última del hormigón
$\varepsilon_m$	Deformación mecánica del hormigón
$\varepsilon_{nm}$	Deformación no mecánica del hormigón
$\varepsilon_{cs}$	Deformación de retracción del hormigón
$\varepsilon_{el}$	Deformación unitaria elástica
$\varepsilon_\varphi$	Deformación de fluencia
$\varepsilon_p$	Deformación del acero de pretensar
$\varepsilon_{pl}$	Deformación plástica
$\varepsilon_s$	Deformación del acero
$\varepsilon_y$	Deformación de plastificación
$\varepsilon_{s1}$	Deformación del acero en sección bruta
$\varepsilon_{s2}$	Deformación del acero desnudo
$\varepsilon_{sr2}$	Deformación de del acero desnudo en fisuración
$\varepsilon_{sm}$	Deformación media del acero con rigidización
$\varepsilon_T$	Deformación por efecto de la temperatura

---

$\eta$	Coefficiente de no linealidad en fluencia
$\eta_t$	Relajación del acero de pretensar
$\varphi$	Coefficiente de fluencia
$\lambda$	Relación tensión resistencia
$\Phi$	Diámetro de un redondo de acero
$\rho_l$	Cuantía de acero traccionado
$\sigma$	Tensión
$\sigma_c$	Tensión del hormigón
$\sigma_p$	Tensión del acero de pretensar
$\sigma_{p0}$	Tensión inicial del acero de pretensar
$\sigma_{pr}$	Tensión relajada del acero de pretensar
$\sigma_{pr}^*$	Tensión relajada reducida del acero de pretensar
$\sigma_s$	Tensión del acero
$\sigma_{sr}$	Tensión del acero en la sección fisurada al fisurar
$\tau$	Traslación de origen de tiempos para la serie de Dirichlet
$\theta$	Ángulo entre bielas de compresión de hormigón y eje horizontal



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>V</b>
<b>Notación</b>	<b>VII</b>
<b>1. Introducción</b>	
1.1. Planteamiento del problema y motivación del trabajo	1
1.2. Objetivos perseguidos y tareas a desarrollar	2
1.3. Organización del trabajo	2
<b>2. Revisión del estado del conocimiento</b>	
2.1. Introducción y objetivos	5
2.2. Hormigón	5
2.2.1. Comportamiento instantáneo	5
2.2.2. Comportamiento diferido	7
2.2.2.1. Retracción	9
2.2.2.2. Fluencia	12
2.2.2.3. Métodos de cálculo	15
2.2.2.4. Deformaciones de origen térmico	18
2.3. Acero pasivo y estructural	18
2.4. Acero activo	19
2.4.1. Comportamiento diferido. Métodos de cálculo	20
2.4.1.1. Método del coeficiente de relajación	20
2.4.1.2. Método del tiempo ficticio	21
2.5. Conclusiones	21
<b>3. Modelo para el análisis de secciones</b>	
3.1. Introducción	23
3.2. Hormigón	24
3.2.1. Comportamiento instantáneo	24
3.2.2. Comportamiento diferido	25
3.2.3. Método del Coeficiente $\chi$ a nivel de fibra	27
3.3. Acero activo	29
3.4. Acero pasivo	31
3.5. Acero estructural	32
3.6. Aplicación al análisis de secciones	33
3.6.1. Consideraciones generales	33

3.6.1.1. Equilibrio	33
3.6.1.2. Compatibilidad	34
3.6.2. Convenio de signos. Idealización de la sección	34
3.6.3. Discretización del tiempo	36
3.6.4. Tratamiento de interfaces	37
3.6.4.1. Deslizamientos relativos	37
3.6.4.2. Interfaz acero estructural – losa de hormigón	37
3.6.4.3. Fisuración del hormigón	38
<b>4. Análisis de secciones de hormigón</b>	
4.1. Introducción	39
4.2. Análisis de un pilote de hormigón armado	39
4.2.1. Introducción	39
4.2.2. Objetivos	40
4.2.3. Descripción de la sección	40
4.2.4. Resultados del análisis	41
4.2.5. Análisis de los resultados	43
4.3. Influencia de la construcción evolutiva en una sección compuesta	44
4.3.1. Introducción	44
4.3.2. Objetivos	44
4.3.3. Descripción de la sección	45
4.3.4. Resultados del análisis	46
4.3.5. Análisis de los resultados	47
4.4. Influencia de la construcción evolutiva en el comportamiento en servicio y rotura de una sección de puente de vigas prefabricadas isostático	48
4.4.1. Introducción	48
4.4.2. Objetivos	49
4.4.3. Descripción de la sección y de las cargas de análisis	49
4.4.4. Resultados del análisis	51
4.4.4.1. Construcción no apeada	51
4.4.4.2. Construcción apeada	52
4.4.4.3. Pérdidas de pretensado	53
4.4.4.4. Capacidad resistente	54
4.5. Conclusiones obtenidas	56
<b>5. Análisis de secciones mixtas</b>	
5.1. Introducción	57
5.2. Comportamiento frente a momentos negativos y positivos de una sección mixta con alas metálicas clase III	58
5.2.1. Comportamiento frente a momentos negativos	58
5.2.2. Comportamiento frente a momentos positivos	61
5.2.3. Conclusiones	63
5.3. Doble acción mixta	63
5.4. Presolicitación en taller mediante pretensado. Análisis de una sección fabricada con el sistema NEX – TEN	65
5.4.1. Introducción	65

5.4.2.	Definición de la sección y objetivos	65
5.4.3.	Presentación de los resultados	67
5.4.3.1.	Estados tensionales para la sección no apeada	67
5.4.3.2.	Estados tensionales para la sección apeada	68
5.4.3.3.	Pérdidas de pretensado	69
5.4.3.4.	Capacidad resistente	70
5.4.4.	Conclusiones	71
<b>6.</b>	<b>Análisis de secciones de hormigón fisuradas</b>	
6.1.	Introducción	73
6.2.	Modelos constitutivos	73
6.2.1.	Compresión	73
6.2.2.	Tracción	74
6.3.	Microfisuración por compresión	75
6.3.1.	Introducción	75
6.3.2.	Bases de cálculo	76
6.3.3.	Ejemplo de aplicación	76
6.4.	Fisuración por tracción	78
6.4.1.	Introducción	78
6.4.2.	Causas de la fisuración	78
6.4.2.1.	Fisuras de origen tensional	79
6.4.2.2.	Fisuras de origen atensional	79
6.4.2.3.	Fisuras debidas a otras causas	79
6.4.3.	Fases de la fisuración	79
6.4.3.1.	Fase 1 (Elástica)	80
6.4.3.2.	Fase 2 (Formación de fisura)	80
6.4.3.3.	Fase 3 (Estabilización de la fisura)	81
6.4.4.	Cálculo del ancho de fisura	81
6.4.4.1.	Modelo EHE (EC-2)	81
6.4.4.2.	Modelo del MC-90	82
6.4.4.3.	Comparación entre ambos modelos	82
6.4.4.4.	Modelo adoptado	83
6.4.5.	Ejemplo de aplicación	83
6.5.	Momento de fisuración con diagramas Momento – Curvatura	85
6.5.1.	Secciones simples	85
6.5.1.1.	Ejemplo de aplicación para una sección armada	85
6.5.1.2.	Ejemplo de aplicación para una sección pretensada	87
6.5.2.	Secciones compuestas	88
6.5.2.1.	Ejemplos de aplicación para secciones compuestas	88
6.6.	Conclusiones	92
<b>7.</b>	<b>Análisis en rotura de secciones</b>	
7.1.	Introducción	95
7.2.	Modelos constitutivos	95
7.2.1.	Hormigón	95
7.2.1.1.	Bloque rectangular equivalente	96
7.2.1.2.	Diagrama parábola – rectángulo	96

7.2.1.3.Comparación entre ambos diagramas	98
7.2.2. Aceros activos y pasivos	99
7.2.2.1.Acero activo	99
7.2.2.2.Acero pasivo y estructural	99
7.3. Análisis en rotura frente a solicitaciones normales	100
7.3.1. Sección resistente de hormigón	100
7.3.2. Sección resistente de acero estructural	100
7.3.3. Deformaciones máximas. Diagrama de interacción	100
7.3.3.1.Ejemplo de aplicación para una sección mixta	101
7.3.4. Análisis en rotura de soportes de alta resistencia	103
7.3.4.1.Ejemplo de aplicación de cálculo de soporte de HAR	105
7.4. Análisis en rotura frente a cortante	107
7.4.1. Introducción	107
7.4.2. Secciones de hormigón convencional	107
7.4.3. Secciones de hormigón de alta resistencia	107
7.4.4. Secciones compuestas por dos hormigones	108
7.4.4.1.Cortante de agotamiento en vigas compuestas	108
7.4.4.2.Cortante de agotamiento en losas compuestas	110
7.4.4.3.Ejemplo de aplicación de cálculo del cortante de agotamiento en secciones compuestas	110
7.5. Conclusiones	112

## 8. Resumen y conclusiones

8.1. Introducción	113
8.2. Revisión del estado del conocimiento	113
8.2.1. Comportamiento reológico de los materiales	113
8.2.2. Principales métodos de cálculo tensión – deformación del bajo el principio de superposición	114
8.3. Modelo desarrollado	114
8.4. Análisis de secciones en servicio y en rotura	115
8.5. Aplicaciones para el programa	116
8.6. Perspectivas para el programa	117
8.7. Propuestas de mejora	117

## Bibliografía 119

### Apéndice. Método del coeficiente de envejecimiento

1. Introducción	123
2. Método del coeficiente $\chi$ aplicado al análisis de fibras	123
3. Fórmula propuesta para el cálculo del coeficiente $\chi$	127
4. Método del coeficiente $\chi$ aplicado al análisis de secciones	128