

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1-1</b>
<b>2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....</b>	<b>2-1</b>
<b>2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN .....</b>	<b>2-2</b>
2.1.1 ÍNDICES DE DEFORMABILIDAD A NIVEL DEL ELEMENTO .....	2-3
2.1.2 ÍNDICES DE DEFORMABILIDAD A NIVEL DE LA SECCIÓN .....	2-3
2.1.3 ÍNDICES DE DEFORMABILIDAD DE LA RÓTULA PLÁSTICA .....	2-4
2.1.4 INTERACCIÓN ENTRE LOS DIFERENTES FACTORES DE DUCTILIDAD .....	2-4
<b>2.2 MÉTODOS TEÓRICOS QUE EVALÚAN LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO .....</b>	<b>2-5</b>
2.2.1 MÉTODOS EMPÍRICOS .....	2-6
2.2.1.1 Método empírico propuesto por Panagiotakos y Fardis (2001) .....	2-6
2.2.1.2 Método empírico propuesto por Lam, Wu, Wong, Wang, Li (2003) .....	2-10
2.2.2 MÉTODOS ANALÍTICOS SIMPLIFICADOS .....	2-11
2.2.2.1 Método analítico de Priestley y Park (1996) .....	2-12
2.2.2.2 Método de Lehman y Moehle (1998) .....	2-15
2.2.2.3 Método analítico de Fardis et al. (2001) .....	2-16
2.2.3 LONGITUD DE RÓTULA PLÁSTICA .....	2-20
2.2.3.1 Expresiones de $L_p$ obtenidas a partir de la integración de la curvatura inelástica .....	2-21
2.2.3.2 Expresiones de $L_p$ obtenidas a partir del análisis del soporte en voladizo .....	2-23
2.2.4 MÉTODOS ANALÍTICOS MÁS COMPLEJOS .....	2-26
2.2.4.1 Método para elementos en flexión sin carga axial .....	2-26
2.2.4.2 Método para elementos en flexión con carga axial .....	2-29
<b>2.3 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL .....</b>	<b>2-34</b>
2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA BASE DE DATOS DE FARDIS ET AL. (2001) .....	2-34
2.3.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE ESTE ESTUDIO .....	2-35
2.3.2.1 Descripción de los modelos de ensayo que componen la base de datos .....	2-36
2.3.2.2 Análisis de las características de los ensayos que componen la base de datos .....	2-40
<b>2.4 NORMATIVA .....</b>	<b>2-42</b>
2.4.1 MÉTODOS PROPUESTOS PARA EVALUAR O PREDECIR LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN .....	2-42
2.4.1.1 Eurocódigo 8: parte 2 .....	2-42
2.4.1.2 Eurocódigo 8: parte 3 .....	2-44

### **3 PLANTEAMIENTO DE LA TESIS .....3-1**

<b>3.1</b>	<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>3-1</b>
<b>3.2</b>	<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO .....</b>	<b>3-2</b>
3.2.1	MODELOS EMPÍRICOS .....	3-2
3.2.2	MODELOS ANALÍTICOS SIMPLIFICADOS .....	3-2
3.2.3	MÉTODOS ANALÍTICOS MÁS COMPLEJOS .....	3-5
3.2.4	ESTUDIOS EXPERIMENTALES .....	3-5
<b>3.3</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3-6</b>
<b>3.4</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3-7</b>
3.4.1	OBJETIVO GENERAL .....	3-7
3.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3-7
<b>3.5</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>3-9</b>

### **4 MODELO DE ENSAYO Y DESARROLLO DEL PROGRAMA**

#### **EXPERIMENTAL .....4-1**

<b>4.1</b>	<b>OBJETIVO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>4-2</b>
<b>4.2</b>	<b>MODELO DE ENSAYO .....</b>	<b>4-2</b>
<b>4.3</b>	<b>PARÁMETROS DE ESTUDIO .....</b>	<b>4-3</b>
<b>4.4</b>	<b>DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL SOPORTE .....</b>	<b>4-4</b>
<b>4.5</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS SOPORTES ENSAYADOS .....</b>	<b>4-6</b>
<b>4.6</b>	<b>PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>4-8</b>
4.6.1	HORMIGÓN .....	4-8
4.6.1.1	Materiales utilizados en la fabricación del hormigón .....	4-9
4.6.1.2	Resultados de los ensayos de compresión simple .....	4-9
4.6.2	ACERO.....	4-10
<b>4.7</b>	<b>DESARROLLO DEL ENSAYO .....</b>	<b>4-11</b>
4.7.1	DESCRIPCIÓN DEL PÓRTICO DE CARGA .....	4-11
4.7.2	INSTRUMENTACIÓN .....	4-12
4.7.2.1	Deformación dentro de la zona de rótula plástica .....	4-12
4.7.2.2	Deformada del soporte .....	4-13
4.7.2.3	Carga de flexión y carga axial .....	4-14
4.7.2.4	Control en la ejecución del ensayo .....	4-15
4.7.3	EJECUCIÓN DEL ENSAYO.....	4-15

## **5 RESULTADOS DIRECTOS Y OBSERVACIONES EXPERIMENTALES .....5-1**

<b>5.1</b>	<b>RESULTADOS DIRECTOS .....</b>	<b>5-1</b>
5.1.1	CARGA VERTICAL .....	5-1
5.1.2	DEFORMADA .....	5-3
5.1.3	DEFORMACIÓN DE LA ARMADURA EN COMPRESIÓN Y TRACCIÓN.....	5-3
<b>5.2</b>	<b>EFFECTOS OBSERVADOS DURANTE EL ENSAYO.....</b>	<b>5-5</b>
5.2.1	DEFORMACIONES DE LA ARMADURA EN LA RÓTULA PUNTO .....	5-5
5.2.2	EFFECTO DE LA RIGIDEZ DEL STUB.....	5-6
5.2.3	PANDEO DE LAS ARMADURAS.....	5-7
<b>5.3</b>	<b>NIVELES DE DAÑO Y APARIENCIA FINAL DE LOS SOPORTES .....</b>	<b>5-7</b>
5.3.1	NIVEL DE DAÑO 1.....	5-8
5.3.2	NIVEL DE DAÑO 2.....	5-8
5.3.3	NIVEL DE DAÑO 3.....	5-9
5.3.4	NIVEL DE DAÑO 4.....	5-9
5.3.5	NIVEL DE DAÑO 5.....	5-10
<b>5.4</b>	<b>RESUMEN GENERAL DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES, DE LOS EFECTOS Y ESTADOS DE DAÑO .....</b>	<b>5-10</b>

## **6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES .....6-1**

<b>6.1</b>	<b>TIPOS DE FALLO .....</b>	<b>6-2</b>
6.1.1	MÉTODO APLICADO EN LA IDENTIFICACIÓN DEL MODO DE FALLO DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	6-2
6.1.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE TIPO DE FALLO .....	6-4
6.1.2.1	Agotamiento por tracción .....	6-4
6.1.2.2	Agotamiento por compresión .....	6-4
6.1.2.3	Inestabilidad .....	6-5
<b>6.2</b>	<b>COMPARACIÓN DEL MOMENTO MÁXIMO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO.....</b>	<b>6-9</b>
6.2.1	DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS PARA EL CÁLCULO DEL MOMENTO TEÓRICO .....	6-9
6.2.2	RESULTADOS DEL MOMENTO MÁXIMO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO .....	6-11
6.2.3	COMPARACIÓN ENTRE EL MOMENTO MÁXIMO EXPERIMENTAL Y EL TEÓRICO RESPECTO A LOS PARÁMETROS ANALIZADOS.....	6-14
<b>6.3</b>	<b>COMPARACIÓN DE LA CARGA MÁXIMA EXPERIMENTAL Y TEÓRICA .....</b>	<b>6-15</b>
6.3.1	DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS PARA EL CÁLCULO DE LA CARGA MÁXIMA TEÓRICA .....	6-15
6.3.2	RESULTADOS DE LA CARGA MÁXIMA EXPERIMENTAL Y TEÓRICA.....	6-16
6.3.3	COMPARACIÓN ENTRE LA CARGA MÁXIMA EXPERIMENTAL Y TEÓRICA RESPECTO A LOS PARÁMETROS ANALIZADOS .....	6-19
6.3.4	DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN .....	6-21

<b>6.4</b>	<b>IDEALIZACIÓN DE LOS DIAGRAMAS CARGA FLECHA Y MOMENTO CURVATURA .....</b>	<b>6-23</b>
6.4.1	PUNTO DE PLASTIFICACIÓN EFECTIVA DEL DIAGRAMA IDEALIZADO .....	6-23
6.4.1.1	Método utilizado en el Eurocódigo 8 .....	6-23
6.4.1.2	Método basado en el Balance de Energía .....	6-24
6.4.1.3	Método aproximado .....	6-24
6.4.2	PUNTO DE FALLO O ESTADO ÚLTIMO .....	6-25
<b>6.5</b>	<b>APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE IDEALIZACIÓN A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>6-26</b>
6.5.1	DEFORMACIONES DEL HORMIGÓN Y DEL ACERO EN EL PUNTO DE PLASTIFICACIÓN .....	6-27
6.5.1.1	Comparación de las deformaciones en los puntos de plastificación .....	6-27
6.5.2	RESULTADOS DE LA IDEALIZACIÓN DEL DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA (M-Φ) .....	6-34
6.5.2.1	Influencia de la esbeltez de cortante .....	6-34
6.5.2.2	Influencia del nivel de carga axil .....	6-36
6.5.2.3	Influencia de la cuantía de armadura longitudinal .....	6-38
6.5.2.4	Influencia de la cuantía de armadura transversal .....	6-41
6.5.3	RESULTADOS DE LA IDEALIZACIÓN A NIVEL DEL ELEMENTO (P-Δ) .....	6-44
6.5.3.1	Influencia del nivel de carga axial .....	6-45
6.5.3.2	Influencia de la esbeltez de cortante .....	6-47
6.5.3.3	Influencia de la cuantía de armadura longitudinal .....	6-48
6.5.3.4	Influencia de la cuantía de armadura transversal .....	6-51
<b>6.6</b>	<b>LONGITUD DE RÓTULA PLÁSTICA .....</b>	<b>6-55</b>
6.6.1	CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO ELÁSTICO TEÓRICO TENIENDO EN CUENTA LOS EFECTOS P-Δ .....	6-57
6.6.2	LONGITUD DE RÓTULA PLÁSTICA EQUIVALENTE .....	6-59
6.6.3	COMPARACIÓN ENTRE LA LONGITUD DE RÓTULA PLÁSTICA EXPERIMENTAL Y LA CALCULADA MEDIANTE EXPRESIONES EMPÍRICAS .....	6-63
6.6.4	COMPARACIÓN ENTRE LAS LONGITUDES DE ROTÚLA EXPERIMENTALES Y LAS OBTENIDAS EN OTROS ESTUDIOS .....	6-69
<b>6.7</b>	<b>COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA NORMATIVA .....</b>	<b>6-73</b>
6.7.1	ANÁLISIS DE LOS FACTORES DE DUCTILIDAD EXPERIMENTAL RESPECTO A LA NORMATIVA .....	6-75
<b>6.8</b>	<b>RIGIDEZ EFECTIVA .....</b>	<b>6-77</b>

## **7 CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE SOPORTES DE HORMIGÓN ARMADO .....7-1**

<b>7.1</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ATENA .....</b>	<b>7-2</b>
7.1.1	EL MODELO CONSTITUTIVO BASADO EN UNA APROXIMACIÓN DE FISURACIÓN DISTRIBUIDA (“SMEARED CRACK MODEL”) .....	7-2

7.1.1.1	Modelo de fisuración .....	7-2
7.1.1.2	Curva tensión-deformación equivalente .....	7-3
7.1.1.3	Parámetros del modelo del hormigón .....	7-5
7.1.2	CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN DEL ACERO PARA LA ARMADURA .....	7-6
<b>7.2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>7-7</b>
7.2.1	RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO .....	7-7
<b>7.3</b>	<b>CALIBRACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>7-8</b>
7.3.1	ENERGÍA DE LA FRACTURA .....	7-9
7.3.2	RAMA DE REBLANDECIMIENTO PARA EL HORMIGÓN EN COMPRESIÓN .....	7-10
7.3.3	MODELO DE CONFINAMIENTO .....	7-11
7.3.4	INCORPORACIÓN DEL MODELO DE ADHERENCIA .....	7-12
<b>7.4</b>	<b>COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES ...</b>	<b>7-13</b>
<b>7.5</b>	<b>CONSIDERACIONES FINALES.....</b>	<b>7-15</b>
<b>8 ESTUDIO PARAMÉTRICO .....</b>		<b>8-1</b>
<b>8.1</b>	<b>PARÁMETROS DE ESTUDIO .....</b>	<b>8-2</b>
8.1.1	NIVEL DE CARGA AXIAL.....	8-2
8.1.2	ESBELTEZ GEOMÉTRICA.....	8-2
8.1.3	LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN .....	8-3
8.1.4	CUANTÍA DE ARMADURA LONGITUDINAL.....	8-4
8.1.5	ARMADURA TRANSVERSAL .....	8-5
<b>8.2</b>	<b>PROGRAMA DE ENSAYOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>8-6</b>
<b>8.3</b>	<b>ANÁLISIS PARAMÉTRICO .....</b>	<b>8-9</b>
8.3.1	DESPLAZAMIENTO ELÁSTICO EFECTIVO .....	8-10
8.3.1.1	Nivel de carga axial.....	8-10
8.3.1.2	Esbeltz de cortante.....	8-12
8.3.1.3	Cuantía de armadura longitudinal .....	8-14
8.3.1.4	Cuantía de armadura transversal.....	8-16
8.3.2	DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO.....	8-17
8.3.2.1	Nivel de carga axial.....	8-17
8.3.2.2	Esbeltz de cortante.....	8-18
8.3.2.3	Cuantía de armadura longitudinal .....	8-20
8.3.2.4	Cuantía de armadura transversal.....	8-23
8.3.3	DUCTILIDAD DE DESPLAZAMIENTO .....	8-25
8.3.3.1	Nivel de carga axial.....	8-25
8.3.3.2	Esbeltz de cortante.....	8-27
8.3.3.3	Cuantía de armadura longitudinal .....	8-30
8.3.3.4	Cuantía de armadura transversal.....	8-32
<b>8.4</b>	<b>RESUMEN GENERAL DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO .....</b>	<b>8-33</b>

## **9 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN MEDIANTE MÉTODOS EXISTENTES ..... 9-1**

<b>9.1 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS EXISTENTES Y LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES, PARA LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN .....</b>	<b>9-2</b>
9.1.1 MÉTODO ANALÍTICO DE PANAGIOTAKOS Y FARDIS .....	9-2
9.1.1.1 Descripción del método .....	9-2
9.1.1.2 Comparación entre resultados experimentales y teóricos obtenidos mediante el método analítico de Panagiotakos y Fardis .....	9-9
9.1.2 MÉTODO ANALÍTICO DEL EUROCÓDIGO 8 .....	9-12
9.1.2.1 Descripción del método .....	9-12
9.1.2.2 Comparación entre resultados experimentales y teóricos obtenidos mediante el método analítico del Eurocódigo 8 .....	9-14
9.1.3 MÉTODOS EMPÍRICOS .....	9-17
9.1.4 CONSIDERACIONES DE LA COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS TEÓRICOS Y LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	9-20
<b>9.2 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS TEÓRICOS Y LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA, PARA LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN.....</b>	<b>9-21</b>
9.2.1.1 Comparación de los métodos respecto a la esbeltez de cortante .....	9-23
9.2.1.2 Comparación de los métodos respecto al nivel de carga axial .....	9-24
9.2.1.3 Comparación de los métodos respecto a la resistencia del hormigón ...	9-27
9.2.1.4 Comparación de los métodos respecto a la cuantía de armadura longitudinal.....	9-29
9.2.1.5 Comparación de los métodos respecto a la cuantía de armadura transversal .....	9-30
9.2.2 CONSIDERACIONES DE LA COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS TEÓRICOS Y LOS RESULTADOS NUMÉRICOS .....	9-32

## **10 PROPUESTA DE MÉTODO SIMPLIFICADO ..... 10-1**

<b>10.1 EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ ELÁSTICA EFECTIVA DE SOPORTES DE HORMIGÓN .....</b>	<b>10-2</b>
10.1.1 METODOLOGÍA.....	10-2
10.1.2 FACTOR DE RIGIDEZ ELÁSTICO EFECTIVO DE DISEÑO $\alpha_e^*$ .....	10-3
10.1.3 FACTOR DE RIGIDEZ ELÁSTICO EFECTIVO DE COMPROBACIÓN $\alpha_e$ .....	10-6
<b>10.2 EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ ÚLTIMA DE SOPORTES DE HORMIGÓN .....</b>	<b>10-8</b>
10.2.1 METODOLOGÍA.....	10-8
10.2.2 FACTOR DE RIGIDEZ ÚLTIMO DE DISEÑO $\alpha_u^*$ .....	10-10
10.2.3 FACTOR DE RIGIDEZ ÚLTIMO DE COMPROBACIÓN $\alpha_u$ .....	10-11
10.2.4 VARIABLES QUE PUEDEN SER EVALUADAS MEDIANTE LOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS PROPUESTOS .....	10-13
<b>10.3 EVALUACIÓN DEL ERROR .....</b>	<b>10-14</b>
10.3.1 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA .....	10-14

10.3.2	COMPROBACIÓN DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS Y LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	10-24
<b>10.4</b>	<b>COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS PROPUESTOS Y LOS MÉTODOS EXISTENTES.....</b>	<b>10-24</b>
10.4.1	COMPARACIÓN EN ESTADO ELÁSTICO .....	10-24
10.4.2	COMPARACIÓN EN EL ESTADO ÚLTIMO .....	10-27
10.4.3	COMPARACIÓN DE LA DUCTILIDAD.....	10-31

## **11 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....11-1**

11.1	CONCLUSIONES .....	11-1
11.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	11-9

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... R-1**

## **ANEJOS**

**ANEJO A:** RESUMEN DE LOS ESTUDIOS EXPERIMENTALES INCLUIDOS EN LA BASE DE DATOS .....

A1

**ANEJO B:** RESULTADOS DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN EN COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS .....

B1

**ANEJO C:** DESCRIPCIÓN DEL PÓRTICO DE CARGA Y PROCESO CONSTRUCTIVO DE SOPORTES .....

C1

**ANEJO D:** FOTOS DEL ESTADO DE DAÑO AL FINALIZAR EL ENSAYO.....

D1

**ANEJO E:** RESULTADOS DIRECTOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.....

E1

**ANEJO F:** IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE FALLO.....

F1

**ANEJO G:** DEFORMACIONES DEL ACERO Y DEL HORMIGÓN EN EL PUNTO DE PLASTIFICACIÓN APLICANDO DIFERENTES MÉTODOS.....

G1

**ANEJO H:** IDEALIZACIÓN DE LOS DIAGRAMAS MOMENTO CURVATURA EXPERIMENTAL.....

H1

**ANEJO I:** IDEALIZACIÓN DE LOS DIAGRAMAS CARGA FLECHA EXPERIMENTAL.....

I1

<u>ANEJO J: RESULTADOS DE LA IDEALIZACIÓN MOMENTO-CURVATURA Y CARGA- FLECHA.....</u>	J1
<u>ANEJO K: DESPLAZAMIENTOS ELÁSTICO TEÓRICOS Y LONGITUDES DE RÓTULA PLÁSTICA.....</u>	K1
<u>ANEJO L: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CARGA-DESPLAZAMIENTO EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS.....</u>	L1
<u>ANEJO M: RESPUESTA CARGA FLECHA E IDEALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NUMÉRICOS.....</u>	M1
<u>ANEJO N: LISTADO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS NUMÉRICO.....</u>	N1