

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES.....	1.1
1.2. OBJETIVOS GENERALES.....	1.3
1.3. CONTENIDO DEL DOCUMENTO.....	1.4

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN.....	2.1
2.2. PRINCIPALES PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO	
ADHERENTE.....	2.8
2.2.1. Propiedades estructurales.....	2.8
2.2.1.1. Recubrimiento del hormigón y separación entre las armaduras.....	2.8
2.2.1.2. Posición de las armaduras durante el hormigonado.....	2.9
2.2.1.3. Longitud adherida.....	2.9
2.2.1.4. Existencia de armadura transversal.....	2.9
2.2.1.5. Existencia de presión normal a la armadura.....	2.10
2.2.1.6. Ciclicidad temporal de la carga.....	2.10
2.2.1.7. Efecto de la temperatura.....	2.10
2.2.2. Propiedades de las armaduras.....	2.11
2.2.2.1. Caracterización de las armaduras.....	2.11
2.2.2.2. Tensiones en el acero y límite elástico.....	2.12
2.2.2.3. Características de la superficie de las armaduras.....	2.12
2.2.3. Propiedades del hormigón.....	2.13
2.2.3.1. Resistencia mecánica del hormigón (a tracción y a compresión).....	2.13
2.2.3.2. Tipo y cantidad de áridos.....	2.13
2.2.3.3. Hormigones ligeros.....	2.14
2.2.3.4. Consistencia del hormigón.....	2.14
2.2.3.5. Adiciones minerales.....	2.14
2.2.3.6. Hormigones con fibras.....	2.14
2.2.3.7. Compactación del hormigón.....	2.15
2.3. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN TRANSVERSAL.....	2.16
2.4. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CURVA CONSTITUTIVA DE	
ADHERENCIA.....	2.29

2.5. MODELOS CONSTITUTIVOS DE ADHERENCIA.....	2.33
2.5.1. Antecedentes.....	2.33
2.5.2. Otros Modelos.....	2.35
2.5.3. Modelos susceptibles de ser implementados.....	2.40
2.6 MODELIZACIÓN DE LA INTERFAZ ACERO-HORMIGÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.....	2.53
2.6.1. Formas de representación de la armadura.....	2.53
2.6.1. Elementos finitos de adherencia.....	2.55
2.7 CONCLUSIONES.....	2.62
2.7.1. Estudio comparativo de diferentes modelos constitutivos de adherencia.....	2.62

## **CAPÍTULO 3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

## **CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PROPUESTO**

4.1. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	4.1
4.1.1. Definición del método de los elementos finitos.....	4.3
4.1.2. Formulación del método de los elementos finitos.....	4.3
4.2. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO CONSTITUTIVO DE LOS MATERIALES.....	4.7
4.2.1. Comportamiento constitutivo del hormigón.....	4.7
4.2.2. Comportamiento constitutivo del acero.....	4.15
4.2.3. Comportamiento constitutivo de adherencia.....	4.16
4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	4.19
4.3.1. Elemento finito triangular de tres nodos.....	4.19
4.3.2. Elemento finito barra de dos nodos.....	4.22
4.3.3. Elemento finito de contacto de adherencia de seis nodos.....	4.24
4.4. MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES NO LINEALES.....	4.30

4.4.1. Método de Newton-Raphson.....	4.31
4.4.2. Métodos de control de respuesta.....	4.33
4.4.2.1. Planteamiento general.....	4.33
4.4.2.2. Método de control por arco (Arc-length).....	4.34
4.4.2.3. Método de control de respuesta con desplazamiento impuesto.....	4.35
4.4.3. Método globalmente convergente.....	4.36

## **CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA**

### **LAVHOR**

5.1. PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS.....	5.1
5.1.1. Perspectiva histórica de la programación.....	5.2
5.1.2. Conceptos de clase y objeto.....	5.2
5.1.3. Propiedades de la POO.....	5.4
5.1.4. Estructura de la aplicación.....	5.5
5.2. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO DE LA APLICACIÓN.....	5.8
5.2.1. Estructura de menús de la aplicación.....	5.8
5.2.2. Menú Materiales.....	5.10
5.2.3. Menú Elementos.....	5.12
5.2.4. Menú Modelos.....	5.14
5.2.5. Menú Resultados.....	5.23

## **CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A LA**

### **CAMPAÑA EXPERIMENTAL**

6.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO EXPERIMENTAL.....	6.2
6.1.1. Parámetros de estudio y nomenclatura de las probetas.....	6.2
6.1.2. Diseño de las probetas.....	6.3
6.1.3. Sistemas de apoyo y carga de las probetas.....	6.5
6.1.4. Características de los materiales empleados.....	6.6
6.1.5. Esquema general de fuerzas.....	6.7
6.2. MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO EXPERIMENTAL.....	6.9

6.2.1. Modelización de las condiciones de contorno.....	6.9
6.2.3. Estudio de la malla.....	6.18
6.3. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO ADHERENTE.....	6.27
6.3.1. Modelo teórico de adherencia propuesto.....	6.27
6.3.2. Adaptación numérica del modelo teórico de adherencia propuesto.....	6.31
6.3.3. Determinación de la tensión normal de saturación del confinamiento.....	6.35
6.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	6.41
6.4.1. Descripción general de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales.....	6.41
6.4.2. Análisis de sensibilidad para ensayos de $f_c= 60$ MPa.....	6.42
6.4.3. Análisis de la variación de la tensión tangencial máxima $\tau_1$ .....	6.46
6.4.4. Análisis de la variación del deslizamiento $\delta_1$ correspondiente a la tensión tangencial máxima $\tau_1$ .....	6.52
6.4.5. Análisis de la variación de la tensión tangencial residual $\tau_3$ .....	6.58
6.4.6. Análisis de la variación del deslizamiento $\delta_3$ correspondiente a la tensión tangencial residual $\tau_3$ .....	6.63
6.4.7. Análisis de la variación de la proporción entre los valores confinado y no confinado de la tensión tangencial máxima y su correspondiente deslizamiento ( $\tau_1$ y $\delta_1$ ).....	6.68
6.4.8. Análisis de la variación de la proporción entre los valores confinado y no confinado de la tensión tangencial residual y su correspondiente deslizamiento ( $\tau_3$ y $\delta_3$ ).....	6.73
6.4.9. Análisis de la variación del deslizamiento $\delta_2$ .....	6.78
6.4.10. Conclusiones.....	6.80
6.5. AJUSTE DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	6.81
6.5.1. Ajuste de los ensayos de $f_c= 30$ MPa.....	6.82
6.5.2. Análisis de los resultados de los ensayos de $f_c= 30$ MPa.....	6.99
6.5.2.1. Estudio del efecto de la longitud adherida ( $l_a= 5$ y $10$ cm).....	6.99
6.5.2.2. Estudio del efecto del ángulo de inclinación de la biela ( $\theta= 63, 45$ y $27^\circ$ ).....	6.117
6.5.2.3. Estudio del efecto del diámetro de la armadura ( $\phi= 12, 16$ y $20$ mm).....	6.125

6.5.3. Ajuste de los ensayos de $f_c= 60$ MPa.....	6.132
6.5.4. Análisis de los resultados de los ensayos de $f_c= 60$ MPa.....	6.144
6.5.4.1. Estudio del efecto de la longitud adherida ( $l_a= 5$ y $10$ cm).....	6.144
6.5.4.2. Estudio del efecto del ángulo de inclinación de la biela ( $\theta= 63, 45$ y $27^\circ$ ).....	6.152
6.5.4.3. Estudio del efecto del diámetro de la armadura ( $\phi= 12, 16$ y $20$ mm).....	6.157
6.5.5. Análisis comparativo entre los resultados de los ensayos de $f_c= 30$ y $60$ MPa.....	6.164
6.6. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PROPUESTO.....	6.177
6.6.1. Consideraciones previas.....	6.177
6.6.2. Modelo teórico propuesto para $f_c=30$ MPa.....	6.178

## **CAPÍTULO 7. OTRAS APLICACIONES**

7.1. ENSAYOS DE ARRANCAMIENTO.....	7.1
7.1.1. Estudio del efecto de la presión normal.....	7.1
7.1.2. Estudio del efecto de la longitud adherida.....	7.7
7.2. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO.....	7.11
7.2.1. Bresler & Scordelis (1963).....	7.11
7.2.2. Burns & Siess (1962).....	7.21

## **CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

8.1. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	8.1
8.2. CONCLUSIONES SOBRE LA APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	8.2
8.3. CONCLUSIONES SOBRE LA APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A OTROS ENSAYOS.....	8.5
8.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	8.5