

CURSO 2014-15

TRABAJO FINAL DE GRADO.

**TITULACIÓN GRADO EN ARQUITECTURA
TÉCNICA.**

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE
HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

Junio 2015

AUTOR:

Lino José Martínez Todolí

TUTORES ACADÉMICOS:

D^a. M. Inmaculada Tort Ausina
(Departamento de mecánica de los medios continuos y teoría
de estructuras)

Dr. José Luis Bonet Senach
(Departamento de ingeniería de la construcción y de proyectos
de ingeniería civil)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
ENGINYERIA
D'EDIFICACIÓ

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

*“El principal maestro de los
hombres en las acciones de
la vida es el infortunio”*

Licurgo (S. VII a.c.)

Resumen.

Una de las funciones de la armadura transversal en elementos de hormigón convencional sometidos a flexo-compresión recta, es la de impedir el pandeo de la armadura longitudinal pasiva. Es importante para que esta armadura transversal haga su función, determinar de forma correcta su separación. En la instrucción del hormigón EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008) así como en otras normativas como la ACI-318 (ACI Committee 318, 2008), se establece una relación entre el diámetro de la barra comprimida más delgada y la separación entre estribos pero sin hacer referencia a ningún tipo de hormigón en concreto ni a ningún cálculo en el que se pueda utilizar esta última variable. El objeto de este trabajo fin de grado es determinar si al añadir fibras metálicas a un elemento de hormigón convencional se aumenta la deformación a la que se produce el pandeo y si la rotura del recubrimiento precede al pandeo. Para ello se van a ensayar dos especímenes sometiéndolos de manera controlada a una situación de carga en la que se provoque el pandeo de la armadura longitudinal pasiva, uno de ellos reforzado con fibras de acero.

Palabras clave.

Armadura transversal, pandeo, fibra de acero, flexo-compresión, separación entre estribos, hormigón armado.

Abstract.

One of the functions of the transverse reinforcing bars in reinforced concrete elements under axial flexo-compression loads is to prevent the passive longitudinal bars buckling. So that this transversal reinforcing bars do its correct function it's important to determinate correctly its separation. At the concrete instruction EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008) the same way as other regulations for instance ACI-318 (ACI Committee 318, 2008), it's established a relationship between the diameter of the thinner passive longitudinal bar and the stirrups but doing neither reference to any kind of concrete nor calculation where to add this last variable. The aim of this final degree job is to determinate whether the buckling's deformation can increase adding steel fibers to a reinforced concrete element and is the break of the concrete cover precedes the buckling. To this end, two columns are going to be tested under controlled load situations where the buckling of the longitudinal passive bars is caused. One of both columns is reinforced with steel fibers.

Key Words.

Transversal reinforcing bars, buckling, steel fiber, flexo-compression, stirrups separation, reinforced concrete.

Agradecimientos.

A mis tutores de proyecto D^a. Inmaculada Tort Ausina y D. José Luis Bonet Senach por su apoyo y dedicación en la realización de este proyecto.

A los compañeros de laboratorio de ICITECH que me han ayudado con las pequeñas dudas que el día a día genera y que pueden suponer un gran escollo si se acumulan.

A la empresa Sika por proporcionarme parte del material empleado.

Al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación de este proyecto.

A mi madre, ya que sin su apoyo y dedicación me hubiese sido imposible compatibilizar 5 años de estudios con mi vida laboral.

Y un agradecimiento muy especial al Ingeniero Javier Pereiro Barceló que me ha dedicado mucho más tiempo del estrictamente necesario para hacerme entender los aspectos más complejos de este proyecto.

Acrónimos.

e: Excentricidad

f_c : Resistencia del hormigón a compresión

f_{ck} : Resistencia de proyecto del hormigón a compresión

$f_{ct,fl}$: Resistencia del hormigón a flexo tracción

f_R : Resistencia residual del hormigón a flexo tracción

HRF: Hormigón reforzado con fibras

HRFA: Hormigón reforzado con fibras de acero

\varnothing_{tmax} : Diámetro máximo de la armadura transversal

\varnothing_t : Diámetro de la armadura transversal

S01: Soporte 01

S02: Soporte 02

S_t : Separación de la armadura transversal

S_{tmax} : Separación máxima de la armadura transversal

TFG: Trabajo final de grado

ϵ_{cu} : Deformación de rotura por flexión del hormigón

ϵ_y : Alargamiento correspondiente al límite elástico del acero

INDICE

Resumen.....	2
Palabras clave.....	2
Abstract.....	3
Key Words.....	3
Agradecimientos.....	4
Acrónimos.....	5
1 CAPITULO I: Estado del arte.....	12
1.1 Introducción.....	12
1.2 Métodos de cálculo.....	13
1.3 Hormigón con fibras.....	15
1.3.1 Introducción.....	15
1.3.2 Las fibras.....	18
1.3.3 Fabricación del HRF.....	20
1.3.4 Características mecánicas.....	21
1.4 Conclusiones.....	23
2 CAPITULO II: Objetivos, metodología y plan de trabajo	24
2.1 Objeto.....	24
2.2 Metodología.....	25
2.3 Plan de trabajo.....	25

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

2.4	Conclusiones.....	26
3	CAPITULO III: Diseño del Experimento.....	28
3.1	Condicionantes físicos.....	28
3.1.1	Pórtico de ensayo.....	28
3.1.2	Superficie de encofrado.....	29
3.1.3	Amasadora.....	30
3.1.4	Puente-grúa.....	31
3.2	Definición geométrica del elemento.....	32
3.3	Definición geométrica de la carga.....	33
3.4	Calculo de las cabezas (regiones D).....	37
3.4.1	Delimitación geométrica de la región D.....	37
3.4.2	Creación del esquema interno de Bielas y Tirantes.....	38
3.4.3	Aplicación de las condiciones de contorno (fuerzas).....	38
3.4.4	Cálculo de las fuerzas axiales en las bielas y los tirantes.....	40
3.5	Armado.....	42
3.6	Encofrados.....	43
3.7	Sistemas de medición.....	43
3.8	Material.....	44
3.8.1	Hormigón.....	44

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

3.8.2	Acero.....	50
3.9	Conclusiones.....	51
4	CAPITULO IV: Ejecución del experimento.....	53
4.1	Revisión y reconfiguración de la ferralla.....	53
4.2	Instrumentación de la ferralla.....	53
4.3	Preparación y montaje de encofrados.....	57
4.4	Colocación de la ferralla en los encofrados.....	58
4.5	Preparación del material para el amasado.....	59
4.6	Amasado del hormigón.....	60
4.7	Puesta en obra y curado del hormigón.....	62
4.8	Desencofrado.....	65
4.9	Preparación del elemento.....	66
4.9.1	Placas de apoyo del elemento.....	66
4.9.2	Galgas de hormigón.....	67
4.10	Colocación del elemento en el pórtico.....	70
4.11	Instrumentación del ensayo.....	71
4.11.1	Transductores de desplazamiento.....	71
4.11.2	Transductor de carga.....	71
4.11.3	Bandas extensiométricas.....	72
4.11.4	Cámara fotográfica.....	73
4.12	Equipo de adquisición de datos.....	74

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

4.13	Ensayo.....	75
4.13.1	Proceso de carga.....	75
4.14	Gestión de residuos.....	77
4.15	Conclusiones.....	78
5	CAPITULO V: Análisis de resultados.....	79
5.1	Determinación experimental de las tensiones y deformaciones de pandeo de las armaduras comprimidas. 79	
5.2	Conclusiones.....	84
6	CAPITULO VI: Aplicación práctica.....	85
6.1	Introducción.....	85
6.2	Ductilidad.....	85
6.3	Simulación.....	89
6.4	Resultado final.....	93
6.5	Conclusiones.....	94
7	CAPITULO VII: Organización.....	96
7.1	Introducción.....	96
7.2	Conclusiones.....	99
8	CAPITULO VIII: Presupuestos.....	100
8.1	Introducción.....	100
8.2	Tablas presupuestarias.....	100
8.3	Conclusiones.....	104

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA

9	CAPITULO IX: Conclusiones	105
9.1	Introducción.....	105
9.2	Plan de trabajo y diseño.....	105
9.3	Ejecución del experimento.	105
9.4	Análisis de datos.	105
9.5	Organización y presupuestos.....	106
9.6	Conclusiones.....	106
9.7	Futuras líneas de trabajo.....	106
10	CAPITULO X: Bibliografía	107
	Anejo I.....	110
	Planos.....	110
	Anejo II.....	117
	Índice de figuras.	117
11	Anejo III	121
	Índice de tablas.....	121
12	Anejo IV	122
	Índice de gráficas.....	122

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

CAPITULO I: Estado del arte.

1.1 Introducción.

En los elementos de hormigón armado sometidos a axiles y flexión puede aparecer el fenómeno de pandeo en las armaduras comprimidas. Este efecto provoca una caída de la carga máxima que puede soportar el elemento de hormigón armado así como una gran disminución de su ductilidad.

La instrucción española de hormigón estructural EHE 08 (Ministerio de Fomento, 2008) en su artículo 42.3.1 dice sobre la separación entre estribos:

Si existen armaduras pasivas en compresión, para poder tenerlas en cuenta en el cálculo será preciso que vayan sujetas por cercos o estribos, cuya separación s_t y diámetro \varnothing_t sean:

$$s_t \leq 15 \varnothing_{min} \quad (\varnothing_{min} \text{ diámetro mínimo de la barra comprimida})$$

$$\varnothing_t \geq 1/4 \varnothing_{max} \quad (\varnothing_{max} \text{ diámetro máximo de la armadura comprimida más gruesa})$$

Para piezas comprimidas, en cualquier caso, s_t debe ser inferior que la dimensión

menor del elemento y no mayor de 30 cm.

De manera que lo que hace es establecer relaciones entre los diámetros de las armaduras longitudinales y la dimensión de los elementos con la separación entre estribos y su diámetro. Sin hacer referencia en ningún caso al recubrimiento de hormigón y por consiguiente tampoco al material que conforma este recubrimiento.

Este mismo criterio de relaciones nos lo encontramos en el Eurocodigo 2 (Union Europea) en su artículo 9.5.3 y en la instrucción estadounidense ACI-318 (ACI Committee 318, 2008) en su artículo 7.10.5.

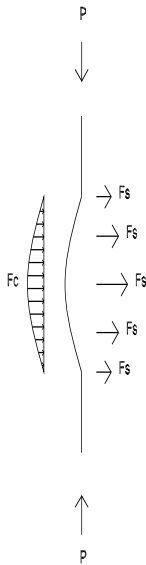
1.2 Métodos de cálculo.

Cuantificar las aportaciones de las armaduras transversales de refuerzo y del recubrimiento de hormigón al retraso de la aparición del pandeo lleva siendo objeto de estudio desde hace varias décadas.

El objetivo de los estudios es encontrar un modelo capaz de predecir la aparición del pandeo. Para ello debe obtenerse una ecuación constitutiva del acero pandeado en la que se pueda determinar la longitud crítica de pandeo.

En una armadura longitudinal pasiva perteneciente a la cara comprimida de un soporte sometido a flexo compresión, aparecen fuerzas laterales que impiden su pandeo. Estas fuerzas pertenecen a la armadura transversal y al recubrimiento de hormigón (fig. 1).

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



(P) Axil que actua sobre el elemento.

(Fc) Reacción del recubrimiento de hormigón

(Fs) Reacción de los estribos.

fig. 1 Esquema real de efecto del recubrimiento y de los estribos.

Los distintos autores simplifican este esquema descartando el efecto del recubrimiento (Maurizio Papia, 1988), (Rajesh Prasad Dhakal, 2002), tratando el efecto de los estribos y del recubrimiento como una carga continua (Giuseppe Campione, 2010), contando solo con el efecto de los estribos como una carga continua (Mohamed M. Talaat, 2008), considerando la barra longitudinal como un elemento aislado sin interacción con los estribos ni con el recubrimiento (Leonardo M. Massone, 2009), (Christopher R. Urmson, 2012) o ,finalmente, el modelo que más se ajusta a la realidad y que aúna los resultados de los

anteriores tratando el efecto del recubrimiento como una carga continua y el de los estribos de manera puntual (Javier Pereiro Barceló, 2014).

1.3 Hormigón con fibras.

1.3.1 Introducción.

El hormigón armado sufre una constante evolución desde que fuera presentado en la exposición universal de 1955 por Joseph-Louis Lambot (1814-1887) a quien se le atribuye su descubrimiento aunque fue el jardinero Joseph Monier (1823-1906) (fig. 2) quien en 1868 presento una patente de un sistema para utilizar este material en la fabricación de losas y macetas.



fig. 2 De izquierda a derecha: Joseph Lambot, Barco de hormigón armado de Lambot y Joseph Monier

Las mejoras sufridas por el hormigón armado afectan a todo cuanto rodea la fabricación y uso de este material, desde la tecnología de los hornos rotatorios para la fabricación de los cementos que cada vez optimizan más la energía empleada, las amasadoras de hormigón con mayores

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

potencias y velocidades que reducen el tiempo de amasado, los distintos modos en los que se pone en obra el hormigón, bombas para ascenderlo a alturas cada vez mayores o proyectarlo mejor, encofrados modulares más rápidos de montar y desmontar o incluso ascendentes, métodos de diseño avanzados que optimizan las prestaciones del material consiguiendo mayores luces o minimizando las cuantías de material y las adiciones y aditivos que se añaden al hormigón dotándolo de cualidades concretas como aligerarlo o reducir los cantos de elementos, o permitiendo usarlo en condiciones extremas de temperatura.(fig. 3)

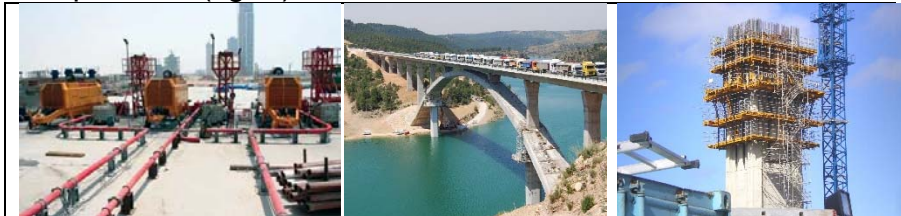


fig. 3 De izquierda a derecha: Estación de bombeo de hormigón, viaducto de Contreras y encofrado trepante.

En lo referente a la adición de fibras, no es algo nuevo. Existen pruebas arqueológicas de más de 4000 años que revelan el uso de fibras en materiales de construcción para mejorar sus propiedades. En la baja Mesopotamia armaban el adobe con paja antes de cocerlo al sol y en el siglo XX se seguía usando pelo de animales para armar yeso, práctica que comenzó a decaer en la década de los treinta por la aparición de las fibras sintéticas.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 5 Cubierta edificio de acceso al Oceanográfico (Valencia) y pasarela sobre el barranco de las Ovejas (Alicante).

1.3.2 Las fibras.

Las fibras se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Fibras de acero.
- Fibras poliméricas.
- Fibras minerales.

Cada tipo de fibra presenta características distintas tal y como se muestra en la Tabla 1. Pero su forma es siempre muy parecida, cortas y de pequeña sección ya que para un óptimo funcionamiento deben distribuirse de manera homogénea por toda la masa de hormigón y en posiciones aleatorias. Otra cosa que tienen en común es su elevada resistencia a tracción en comparación con el hormigón tal y como se aprecia en la Tabla 1 siendo entre 100 y 600 veces mayor.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

Tabla 1 Características mecánicas (Canovas, 2011).

Tipo de fibras	Resistencia a tracción (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (KN/mm ²)	Densidad (Kg/m ³)	Alargamiento de rotura (%)
Acero	500-3000	210	7800	3,5
Acero inox	2100	160	7860	3
Vidrio	2000	60	2700	3,6
Carbón	3000	200-500	1900	0,5
Asbestos	3000	200	2600	2-3
Nilón	900	4	1100	13-15
Polipropileno	400-800	5-25	900	8-20
Poliéster	700-900	8,2	1400	11-13
Kevlar 49	2900	133	1500	2,6
Kevlar 29	2900	69	1500	4
Sisal	400-800	30	1200	3
Hormigón	5-8	30	2300	-

En concreto, en las fibras de acero se destacan tres parámetros importantes a la hora de seleccionarlas (fig. 6):

-Forma. Suelen ser de acero trefilado con formas o rugosidades que aumentan el área específica de la fibra.

-Esbeltez. Tal y como se dice en (Canovas, 2011), la esbeltez es un parámetro numérico que relaciona la longitud de la fibra con el diámetro equivalente de la sección de la fibra y suele oscilar entre 30 y 150.

-Resistencia a tracción. Este parámetro depende del contenido de carbono en el acero y varía desde los 400 MPa en bajo contenido hasta los 1500 MPa para contenidos medios.

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA

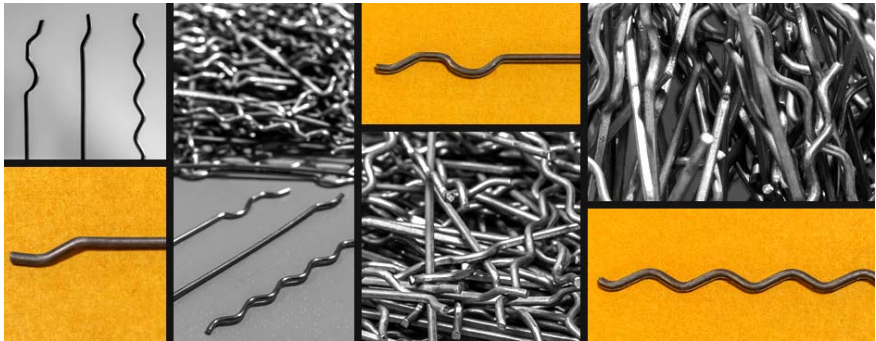


fig. 6 Variedad de formas de fibras metálicas. (Web Fibrometals).

1.3.3 Fabricación del HRF.

La dosificación de las fibras depende de su esbeltez y del tamaño máximo de árido, debiendo ser la longitud de la fibra 2,5 veces mayor que tamaño de árido máximo. Además si se pretende que esta fibra tenga una función estructural, debe haber un contenido mínimo de las mismas de 20 Kg/m³ y un máximo del 1,5% del volumen del hormigón.

Estos parámetros afectan directamente a la docilidad del hormigón y una mala dosificación conlleva la aparición de bolas de fibras que no se reparten de manera homogénea en la masa.

La puesta en obra del HRF se realiza de manera normal pero para su vibrado se necesita una mayor energía durante menos tiempo y teniendo en cuenta que al usar agujas vibratoras, el hueco que dejan al sacarlas del hormigón se rellena con hormigón más rico en pasta, además las fibras tienden a orientarse de forma tangencial al vibrador.

1.3.4 Características mecánicas.

Manuel Fernandez Canovas nos dice en su libro (Canovas, 2011):

La incorporación de fibras de acero a un hormigón puede producir los siguientes efectos:

-Aumento de la resistencia a flexo tracción.

-Aumento de la resistencia a tracción.

-Ligero aumento de la resistencia a compresión.

-Fuerte incremento de la resistencia a impacto.

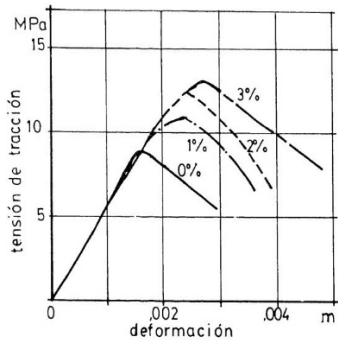
-Aumento de la resistencia a fatiga.

-Fisuración controlada.

-Aumento de la tenacidad.

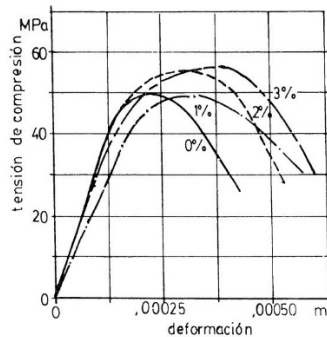
La resistencia a tracción de este material se ve incrementada siendo mayor el incremento a mayor volumen de fibras como se aprecia en la gráfica (Gráfica 1) de (Fernando Rodriguez Lopez, 1984).

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



Gráfica 1 Tensión de tracción-deformación respecto al volumen de fibras.

Sin embargo la resistencia a compresión no se ve apenas afectada por la adición de fibras aunque se aprecia un aumento en la ductilidad una vez alcanzada la tensión de rotura del hormigó (Gráfica 2) (Fernando Rodríguez Lopez, 1984).

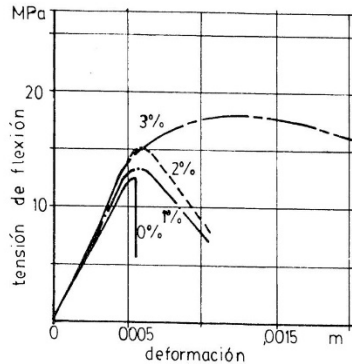


Gráfica 2 Tensión de compresión-deformación respecto al volumen de fibras.

Pero es en los elementos sometidos a flexión donde este material destaca ya que al repartirse las fibras en posiciones aleatorias, las

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA

tensiones se ven distribuidas de manera más eficaz por toda la matriz aumentando la resistencia a flexión al aumentar el volumen de fibras e incrementando la ductilidad de manera destacable (Gráfica 3) (Fernando Rodriguez Lopez, 1984).



Gráfica 3 Tensión flexión-deformación respecto al volumen de fibras.

1.4 Conclusiones.

A pesar de que las fibras llevan presentes en la construcción miles de años y de que el hormigón reforzado con fibras es actualmente utilizado con asiduidad, ciertos aspectos relacionados con el diseño estructural se encuentran en un estado inicial, en el que habiendo avanzado en el campo teórico de manera apreciable, se echa en falta un mayor número de ensayos que corroboren los modelos de cálculo actuales y los asienten en las normativas vigentes.

CAPITULO II: Objetivos, metodología y plan de trabajo

2.1 Objeto.

Uno de los efectos que pueden sufrir las armaduras pasivas de elementos de hormigón armado sometidos a compresión, es el pandeo. Para evitar este efecto y poder tener en cuenta esta armadura en el cálculo la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008) en su artículo 42.3.1 nos indica que deben ir sujetas con cercos o estribos y nos da la forma en que debemos seleccionar sus diámetros y separación entre ellos.

Al no justificar mediante ningún cálculo estas indicaciones de selección se crea una duda al utilizar hormigones mejorados mediante la adición de fibras metálicas. ¿Es posible reducir la cuantía de acero?

Es objeto de este trabajo final de grado comparar dos elementos de hormigón armado de similares características añadiendo a uno de ellos fibras de acero y demostrar si de este modo se incrementa la deformación a la que aparece el fenómeno del pandeo consiguiendo de este modo elementos más seguros y determinar si es la rotura del recubrimiento lo que precede al pandeo o al revés ya que si el HRFA retrasa la rotura del recubrimiento pero ya existe pandeo, no

sería la situación más deseable a la hora de reparar un soporte. Sin embargo, el hecho de que el recubrimiento impida el pandeo significaría que ante una misma situación de carga el armado del soporte no habría sufrido daños y la reparación sería menos costosa.

2.2 Metodología.

Se diseñará un experimento en el que se someterá a dos especímenes a flexo compresión esviada para comprobar en qué momento se produce el pandeo de la armadura longitudinal y determinar si el hormigón reforzado con fibras de acero aporta las cualidades deseadas retardando la aparición de este fenómeno.

2.3 Plan de trabajo.

Se comenzara por la elección de la geometría de los especímenes que van a ser ensayados. Tras lo cual se podrá calcular el armado más adecuado que permita tener localizados los efectos del experimento y además se podrá comenzar la fabricación de los encofrados.

Se determinaran los puntos geométricos que teóricamente aportaran más información durante los ensayos.

Se decidirá qué tipo de hormigón es el más adecuado para este experimento y se caracterizara.

Se debe determinar qué tipo de pórtico de ensayo va a ser el más apropiado y diseñar los elementos necesarios que aseguren un correcto funcionamiento del experimento.

Una vez fabricadas las ferrallas, se instrumentaran con

bandas extensiométricas adheridas al acero en los puntos predeterminados.

En este punto se puede proceder a la fabricación de los especímenes que irán acompañados de probetas de control para confirmar que los ensayos se realizan con el material pretendido.

Los ensayos tendrán lugar 28 días después de la fabricación de los elementos. Para ello se montará cada elemento en el pórtico de ensayo y se terminará de instrumentar con bandas extensiométricas adheridas al hormigón y transductores de desplazamiento. Toda la instrumentación se conectará a los equipos informáticos con los que se realizará la toma de datos. Además se utilizarán una cámara de video que grabara cada ensayo y una cámara fotográfica para realizar un análisis fotogramétrico del ensayo.

Una vez terminado el ensayo de cada espécimen, se retirarán los restos y se procederá a retirar el hormigón en la zona de estudio, dejando al descubierto tanto la armadura longitudinal como la transversal para una comprobación visual de los efectos y consecuencias del ensayo.

Posteriormente se procederá al análisis de los datos obtenidos para la obtención de las conclusiones.

2.4 Conclusiones.

Tras quedar claro que el objetivo es averiguar si hay un aumento de las deformaciones en los soportes reforzados con fibras metálicas que permitan aumentar la separación entre

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

estribos, se determina la metodología a seguir y se diseña el plan de trabajo que incluye el diseño de los elementos en todos sus aspectos (geometría, materiales, solitudes) y la adecuación del experimento al entorno de trabajo disponible.

CAPITULO III: Diseño del Experimento

3.1 Condicionantes físicos.

3.1.1 Pórtico de ensayo.

Se trata de un pórtico auto portante (fig. 7) con dintel de altura ajustable que fue diseñado para un proyecto de investigación anterior del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia (Yazzar. S.A., 2000). Y al que se le ha añadido una placa de apoyo inferior y una placa de apoyo superior (fig. 8) con posibilidad de giro en el plano vertical y perpendicular al plano vertical de interés para el ensayo, diseñadas para este proyecto.



fig. 7 Pórtico de ensayo.



fig. 8 Placas de apoyo inferior y superior.



El pórtico se completa con el gato hidráulico (fig. 9) con capacidad de

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

aplicar hasta 250 toneladas con el que se somete a carga a los elementos a ensayar.



fig. 9 Gato hidráulico.

3.1.2 Superficie de encofrado.

La superficie que se utiliza para el montaje de los encofrados y la posterior fabricación de los elementos, la componen varias planchas modulares de acero de tres metros de longitud y un metro de anchura (fig. 10) fabricadas a tal efecto y con las que se garantiza la planeidad de la cara frontal del elemento. Estas planchas se posicionan

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

directamente en el suelo y se calzan si es necesario para asegurar la nivelación del hormigón fresco.



fig. 10 Plancha de encofrar.

3.1.3 Amasadora.

El amasado del hormigón se realiza con una turbo mezcladora de eje vertical modelo ST-150 CD de la marca Betonmass (fig. 11) con una potencia de 5,5 cv (4 Kw) ,una velocidad de 41 r.p.m. y una capacidad de hasta 150 litros.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 11 Turbo mezcladora de eje vertical.

3.1.4 Puente-grúa.

Para el desencofrado y traslado de los elementos para su almacenaje y posterior puesta en la zona de ensayo, se utiliza un puente-grúa de doble viga (fig. 12) y con una capacidad de elevación de hasta 10 toneladas.



fig. 12 Puente-grúa.

3.2 Definición geométrica del elemento.

Se decide usar una geometría de los elementos similar a la de otros estudios para poder comparar datos y que además puedan ser fabricados con nuestros condicionantes físicos. Por lo que finalmente nos basamos en el diseño utilizado por Giuseppe Campione et al en su artículo publicado en 2010 en ACI Structural Journal. (Giuseppe Campione, 2010).

Se fabrican dos pilares ensanchados en sus extremos cuya geometría y refuerzos de acero se muestran en la (fig. 13).

El armado del espécimen tiene una longitud total de 1310 mm, la zona central tiene una longitud de 600 mm, el núcleo de hormigón es de forma cuadrada y tiene un ancho y profundo de 160 mm medido desde el exterior de los estribos. Se le da un recubrimiento de 20 mm obteniendo un canto $b=200\text{ mm}$.

Los pilares se forman con 2 barras $\text{Ø}16\text{ mm}$ en la cara traccionada y dos barras $\text{Ø}12\text{ mm}$ en la zona comprimida de manera que se asegura el fallo del elemento a compresión. Para la armadura transversal de los pilares se utilizan estribos $\text{Ø}6\text{ mm}$ que se pondrán a 150 mm del centro hacia arriba y hacia abajo y a partir de aquí cada 50 mm.

Los extremos de los pilares se refuerzan mediante 8 barras dobladas $\text{Ø}12\text{ mm}$ para ensanchar la forma y con estribos $\text{Ø}8\text{ mm}$ cada 50 mm.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

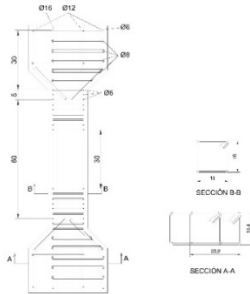


fig. 13 Pilares ensayados.

3.3 Definición geométrica de la carga.

El punto de aplicación de la carga es a $b/2$ (fig. 14) del soporte, siendo b el canto total del soporte.

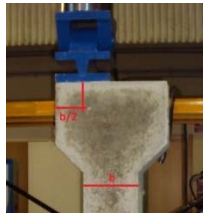


fig. 14 Punto de carga

Esta decisión se toma porque se pretende trabajar en las proximidades del plano de deformación generado entre los puntos B y ϵ_y tal y como se indica en la EHE 08 (Ministerio de Fomento, 2008) en su artículo 42.1.3 representado por la figura 42.1.3 de esta instrucción (fig. 15). Donde B es el

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

valor de deformación última del hormigón ϵ_{cu} y ϵ_y el alargamiento correspondiente al límite elástico del acero en la posición de la armadura más traccionada. En el artículo 39.5 de la EHE 08 (Ministerio de Fomento, 2008) nos define ϵ_{cu} como:

$$\epsilon_{cu} = 0,0035 \quad \text{si } f_{ck} \leq 50\text{N/mm}^2$$

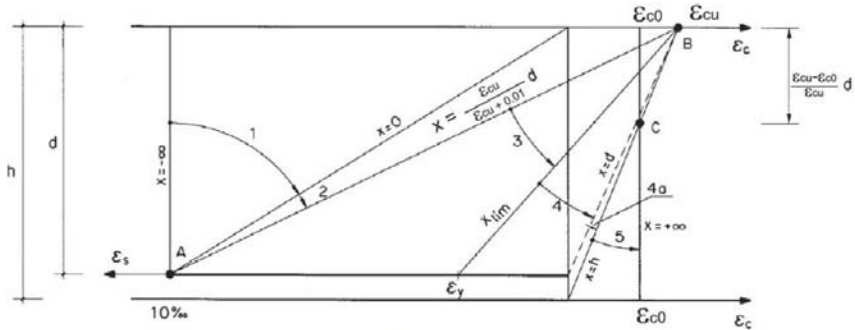


Figura 42.1.3

fig. 15 Dominios de deformación del hormigón.

Se debe trabajar en el plano de x_{lim} (definido por los puntos descritos anteriormente) para asegurar que se llega a plastificar el acero comprimido, se supera la resistencia a compresión del hormigón y no rompe la armadura traccionada, solo plastifica. Para asegurar que el diseño cumple estos requisitos se tiene que decidir que armado utilizar y la excentricidad de la carga. Con el fin de fijar estos parámetros se realiza el diagrama de interacción de la sección del elemento. Para lo cual se plantean tres hipótesis de armado longitudinal y se cruzan con tres hipótesis de

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

excentricidad del punto de aplicación de carga.

Tabla 2 Hipótesis de excentricidad.

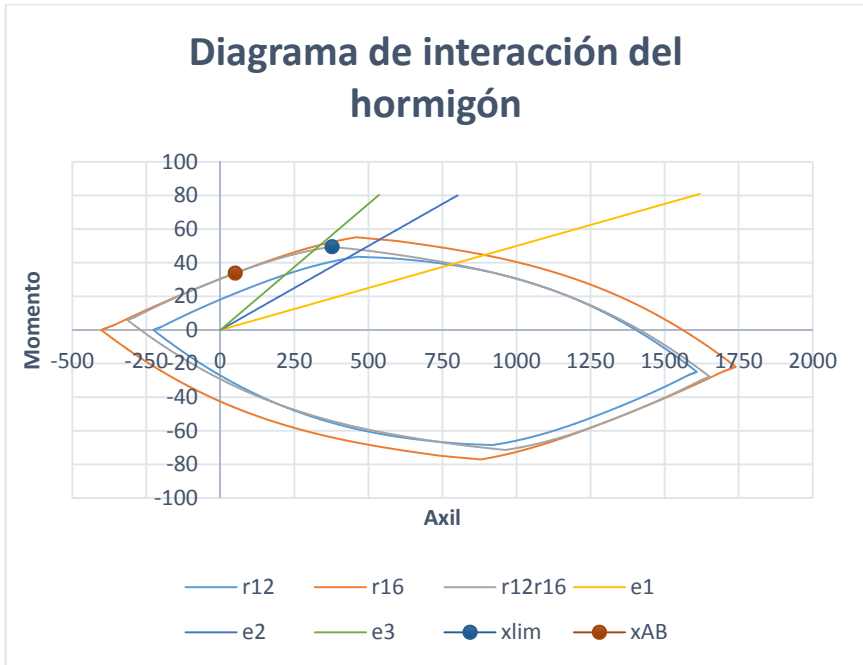
Excentricidades		
$e1=0,25b$	$e2=0,5b$	$e3=0,75b$
*siendo b el canto del elemento		

Tabla 3 Hipótesis de armado longitudinal.

Armado longitudinal		
r12	r16	r12r16
Armadura longitudinal de la cara comprimida y de la cara traccionada de $\varnothing 12$	Armadura longitudinal de la cara comprimida y de la cara traccionada de $\varnothing 16$	Armadura longitudinal de la cara comprimida de $\varnothing 12$ y de la cara traccionada de $\varnothing 16$

Con estos datos se crean las tres graficas de interacción del hormigón para las tres hipótesis de armado (Gráfica 4) y se cruzan con las tres rectas de carga correspondientes a las tres hipótesis de excentricidad.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



Gráfica 4 Diagrama de interacción-recta de carga

En la gráfica observamos como cruzando la recta e2 con el diagrama r12r16, conseguimos aproximarnos a la x_{lim} sin llegar a romper las barras de la cara traccionada lo que permitirá provocar el pandeo de la armadura comprimida sin riesgo de romper antes el elemento a tracción.

Como comprobación para futuras líneas de investigación, se replicó el diagrama con una resistencia mayor del hormigón dando como resultado que la configuración e2-r12 rompía

las barras traccionadas. Así que se optó por una configuración que fuese viable con hormigones de hasta 120 MPa para poder realizar comparaciones.

3.4 Cálculo de las cabezas (regiones D).

Finalmente dado que la carga aplicada en e_2 queda justo en la cara límite del elemento, se debe reconducir hacia la armadura longitudinal, por lo que se refuerzan las cabezas del elemento.

Al tratarse de una región D, (art 24, EHE 08) el método de las Bielas y Tirantes, recogido por la EHE-2008, resulta idóneo para su cálculo. La metodología es la siguiente:

1. Delimitación geométrica de la región D.
2. Creación del esquema interno de Bielas y Tirantes.
3. Aplicación de las condiciones de contorno (fuerzas).
4. Cálculo de las fuerzas axiales en las bielas y los tirantes.

3.4.1 Delimitación geométrica de la región D.

Según la teoría de bielas y tirantes, las tensiones se estabilizan a partir del cambio brusco de geometría una distancia igual a un canto de la sección del soporte. Por lo tanto la región D en este elemento queda delimitada con las siguientes dimensiones (fig. 16)

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

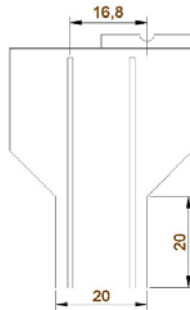


fig. 16 Región D

3.4.2 Creación del esquema interno de Bielasy y Tirantes.

El esquema de Bielasy y Tirantes adoptado nace de la decisión de utilizar en las cabezas estribos en posición perpendicular a las armaduras longitudinales quedando el esquema según se indica en (fig. 17)

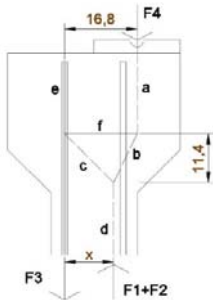
3.4.3 Aplicación de las condiciones de contorno (fuerzas).

Aparecen cuatro fuerzas principales, la reacción de la barra de acero comprimida (F1) que se suma a la reacción del hormigón comprimido (F2) y que juntas se aplican en el mismo punto, la reacción de la barra de acero traccionada (F3) y la fuerza principal que se aplica al elemento (F4).

El punto de aplicación de F4 como se ha dicho anteriormente, se encuentra a $b/2$ desde el centro del

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

elemento. F3 se sitúa en la posición de la barra de acero traccionada, es decir a 3,2 cm de profundidad en el elemento y se calcula la posición de la línea de fuerza combinada de F1 + F2. Para ello se determina la distancia x (fig. 17).



$$\begin{aligned}
 F1 &= 111,33 \text{ kN} \\
 F2 &= 517,44 \text{ kN} \\
 F3 &= 157,19 \text{ kN} \\
 F4 &= 471,58 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

fig. 17 Esquema de bielas y tirantes

$$x = D - \left(\frac{(F1 * C) + (F2 * N)}{F1 + F2} \right) = 0,1268m$$

Donde:

F1 es la fuerza de la barra comprimida.

F2 es la fuerza del hormigón comprimido.

D es la distancia entre la cara comprimida y el centro de la barra traccionada.

C es la distancia entre la cara comprimida y el centro de la barra comprimida.

N es la distancia entre la cara comprimida y el punto de aplicación de F2.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

3.4.4 Cálculo de las fuerzas axiales en las bielas y los tirantes.

De los cálculos y la tabla generados para la obtención del diagrama de interacción y la recta de carga (fig. 18), extraemos la carga máxima esperada y las tensiones. Como parte del diseño se estipula que la distancia vertical entre el nudo *abf* y el nudo *bcd* sea de 11,4 cm para asegurar que no colapsa la biela *b* y además *f* se encuentra en el centro geométrico de la distancia en la que se van a distribuir los estribos. Y sabemos que la distancia entre el punto de aplicación de carga y el tirante *e* que se corresponde con la armadura traccionada es de 16,8 cm.

1	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
2	Plano def						fek		30	12mm12mm		16mm16mm		12mm16mm	
	F comp 12	F trac 12	F comp 16	F trac 16	lamda alfa	area como he F horm			aul	momento	aul	momento	aul	momento	
1215	0,3076	111,74742	88,880211	197,77318	158,00926	0,08648	17216	516,48		538,84721	43,027379	556,14392	53,611907	469,71815	47,728155
1216	0,1077	111,29114	88,650669	197,85091	157,60119	0,08616	17232	516,96		539,60047	43,021406	557,20972	53,596106	470,64995	47,710042
1217	0,31078	111,13478	88,421553	197,92085	157,51987	0,08624	17248	517,44		540,35323	43,015418	558,17462	53,580308	471,58091	47,691936
1218	0,1079	111,37834	88,192862	198,00594	156,78731	0,08632	17264	517,92		541,10548	43,009415	559,13863	53,564514	472,51103	47,673857
1219	0,108	111,42182	87,964594	198,08323	156,3815	0,0864	17280	518,4		541,85723	43,003396	560,10173	53,548722	473,44032	47,655746
1220	0,1081	111,46522	87,736789	198,16019	155,97648	0,08648	17296	518,88		542,60847	42,997363	561,06395	53,532933	474,36828	47,637662
1221	0,1082	111,50854	87,509325	198,2374	155,57213	0,08656	17312	519,36		543,35921	42,991314	562,02527	53,517147	475,2964	47,619585

fig. 18 Extracto de la tabla del diagrama de interacción

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA

Para obtener la carga máxima en el tirante f se necesita saber el ángulo α entre f y c . Se calcula la longitud de c (L_c) y a continuación se calcula α y como se conoce la componente vertical de la biela c , se puede calcular c y seguidamente f .

$$L_c = \sqrt{11,4^2 + 12,68^2} = 17,05 \text{ cm}$$

$$\text{sen} \alpha = \frac{11,4}{17,05} = 0.6686$$

$$\alpha = 41,96^\circ$$

$$c = \frac{157,19}{0,6686} = 235,1 \text{ kN}$$

$$f = \cos \alpha * c = 0,7436 * 235,1 = 174,82 \text{ kN}$$

Se calcula seguidamente el área A de acero necesaria para soportar una tensión de 174,82 KN. Se decide aplicar un coeficiente de mayoramiento del área de 2 por seguridad y con la certeza de que esto no afecta al comportamiento del espécimen en su zona de interés.

$$A = 2 * \frac{f}{\sigma} = 2 * \frac{174820}{500} = 699.28 \text{ mm}^2$$

Se decide utilizar barras de $\varnothing 8$ mm para este refuerzo repartidas equitativamente hacia arriba y hacia abajo del centro geométrico de las cabezas para lo cual se usaran 8 estribos de este diámetro.

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA

$$\frac{699.28\text{mm}^2}{50,26\text{mm}^2} = 13.91 \rightarrow 14 \text{ ramas } 7 \text{ estribos.}$$

3.5 Armado.

Todo el armado se realiza con barras y estribos de acero B500SD (fig. 19).

La ferralla la forman 2 barras de Ø12 y 1310mm de longitud, 2 barras de Ø16 y 1310 mm de longitud, 8 barras Ø12 de 428 mm de longitud acodadas en la zona central 45 grados, 4 estribos de Ø6 de 260mm por 160mm, 2 estribos de Ø8 de 259mm por 164mm, 2 estribos de Ø8 de 209mm por 164mm, 10 estribos de Ø6 de 160mm por 160mm, 14 estribos de Ø8 de 264mm por 164mm, 2 estribos de Ø8 de 250mm por 164mm y 2 estribos de Ø8 de 200mm por 164mm.

Las barras y estribos se atan utilizando alambre de Ø1,2mm.



fig. 19 Elemento montado.

3.6 Encofrados.

Los encofrados se fabrican en madera (fig. 20), son de forma trapezoidal y están reforzados para evitar deformaciones y se complementan con dos maderas en los extremos superior e inferior y dos lamas de acero que además de cerrar lateralmente las cabezas del elemento, sirven para sujetar el resto de piezas.(fig. 21)



fig. 20 Encofrado



fig. 21 Encofrado montado.

3.7 Sistemas de medición.

Para la toma de datos se usa una combinación de bandas extensiométricas (fig. 22) y transductores de desplazamiento (fig. 24) conectados a un equipo de adquisición de datos que a su vez está conectado a un ordenador (fig. 23) con el software propio del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de nombre CEAC y bajo licencia de LabVIEW.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 22 Bandas extensiométricas.



fig. 23 Equipo de adquisición de datos.



fig. 24 Transductor de desplazamiento.

3.8 Material.

3.8.1 Hormigón.

Tal y como se ha indicado anteriormente se fabrican dos elementos, se utiliza para ello un tipo de hormigón al que se le añaden fibras de acero (fig. 25) para uno de los elementos. Por esta razón se decide que el hormigón debe ser auto compactante debido al fenómeno de alineación de las fibras de acero al utilizarse vibradores para compactar el hormigón. Esta decisión conlleva la dificultad de obtener un hormigón

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

auto compactante con resistencia media de 30 MPa. (UNE-EN12390-3, 2003). Tras varias pruebas en las que los resultados superaban los 40 MPa o no se conseguía el diámetro suficiente en el ensayo de escurrimiento (UNE83361, 2007), se decide utilizar un hormigón pre dosificado ensacado cuyas características son las deseadas (fig. 26).

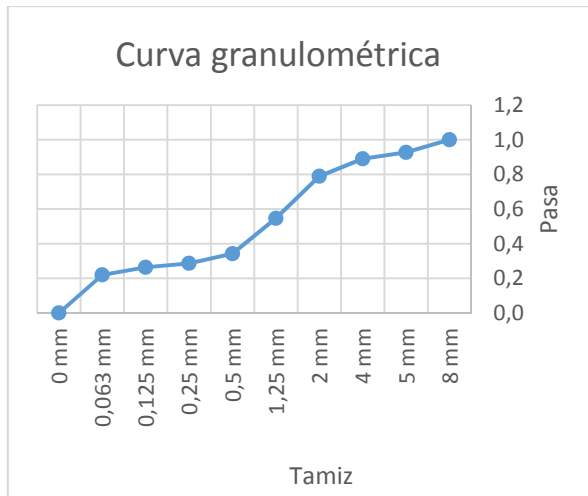
Se procede a realizar pruebas con este hormigón pre dosificado y se observa que la resistencia queda por debajo de la deseada dando una media de 20 MPa por lo que se prueba a añadir distintas cantidades de cemento hasta dar con la dosificación que nos aporta la resistencia deseada y el diámetro en el ensayo de escurrimiento que se necesita para poder mover las fibras de acero (fig. 27). Esto se consigue añadiendo 250 gr de cemento CEM II 42,5 R por cada saco de hormigón pre dosificado que se utilice.

El hormigón pre dosificado tiene una granulometría de 0 a 0,8 mm (Tabla 4), (Gráfica 5). Cada saco contiene 25 Kg de material que permiten la fabricación de aproximadamente 13 litros de hormigón utilizando entre 2,5 y 2,9 litros de agua.

Tabla 4 Granulometría

Sikacrete 08 scc		Tamices (retenido en kilos)										
Muestra		8 mm	5 mm	4 mm	2 mm	1,25 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm	0 mm	TOTAL
1 kg	RETENIDO	-	0,0780	0,0400	0,0990	0,2402	0,1984	0,0558	0,0212	0,0437	0,2237	1
	PASA	1	0,9220	0,8820	0,7830	0,5428	0,3444	0,2886	0,2674	0,2237	0,0000	
1 kg	RETENIDO	-	0,0644	0,0347	0,1034	0,2407	0,2173	0,0560	0,0240	0,0444	0,2151	1
	PASA	1	0,9356	0,9009	0,7975	0,5568	0,3395	0,2835	0,2595	0,2151	0,0000	
1 kg	RETENIDO	-	0,0758	0,0368	0,1012	0,2465	0,1966	0,0549	0,0230	0,0442	0,2210	1
	PASA	1	0,9242	0,8874	0,7862	0,5397	0,3431	0,2882	0,2652	0,2210	0,0000	
RETENIDO	MEDIA	-	0,0727	0,0372	0,1012	0,2425	0,2041	0,0556	0,0227	0,0441	0,2199	
	% PARCIAL	-	7,27%	3,72%	10,12%	24,25%	20,41%	5,56%	2,27%	4,41%	21,99%	
	% ACUMULADO	-	7,27%	10,99%	21,11%	45,36%	65,77%	71,32%	73,60%	78,01%	100,00%	
PASA	MEDIA	1	0,9273	0,8901	0,7889	0,5464	0,3423	0,2868	0,2640	0,2199	0,0000	

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**



Gráfica 5 Granulometría.

Así que el material para la fabricación del hormigón utilizado en este TFG es el siguiente:

Hormigón pre dosificado: Sikacrete®-08 SCC de Sika.

Cemento: CEM II 42,5 R de Cementos Esfera.

Fibras de acero: Dramix 80/30 de Bekaert.

En la Tabla 5 se presentan las dosificaciones para obtener un metro cúbico del hormigón utilizado.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

Tabla 5 Dosificación del hormigón utilizado.

Tipo de hormigón	Sikacrete®-08 SCC (Kg/m ³)	Cemento (Kg/m ³)	Agua (Kg/m ³)	Fibras de acero (Kg/m ³)
30MPa	1923	19,25	185	-
30MPa con fibras	1923	19,25	185	80

Para el control de calidad del hormigón empleado se fabrican junto con cada elemento dos probetas cilíndricas de diámetro 15 cm por 30 cm de altura (UNE-EN12390-3,

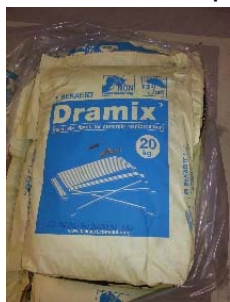


fig. 25 Fibras de acero



fig. 26 Sikacrete®-08 SCC



fig. 27 Ensayo de escurrimiento.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

2003) y además para el elemento con fibras se fabrican tres probetas prismáticas de ancho igual a 150 mm, alto igual a 150 mm y largo igual a 600 mm (UNE-EN14651, 2007). Los resultados del ensayo de escurrimiento (UNE83361, 2007) son los que siguen (Tabla 6).

Tabla 6 Ensayo de escurrimiento.

Elemento	Diámetro (mm)
S01	680
S02	650

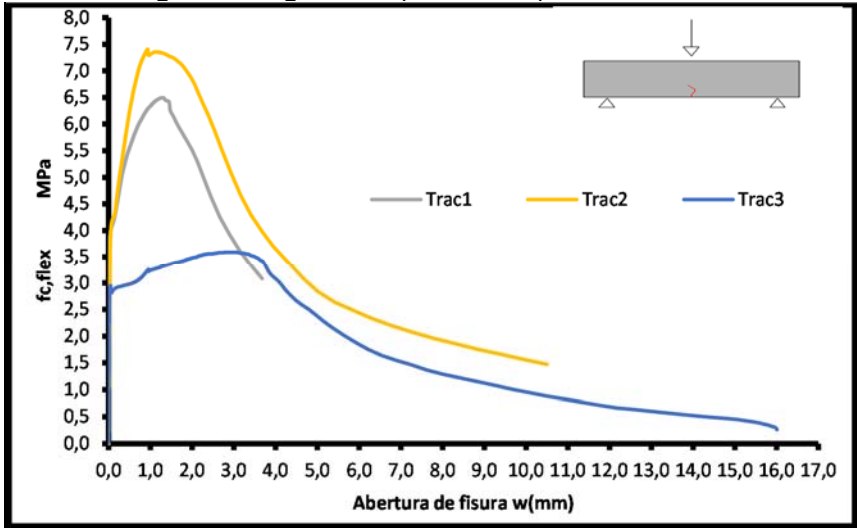
Para las probetas cilíndricas los resultados son los de la siguiente tabla (Tabla 7)

Tabla 7 Resistencia a compresión del hormigón.

Elemento	f_{c1}	f_{c2}	f_{cm}	E_m	Fabricación	Rotura
S01	24,168	27,675	25,9215	27584	18/06/2014	16/07/2014
S02	32,54	29,16	30,85	25225	23/06/2014	21/07/2014
Todos los valores en N/mm ²						

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

Las tres probetas prismáticas se ensayan a tracción y se obtiene la gráfica siguiente (Gráfica 6).



Gráfica 6 Ensayos a tracción del hormigón.

Los resultados de los ensayos de tracción del hormigón son los de la siguiente tabla (Tabla 8).

Tabla 8 Resistencia a tracción del hormigón.

Probeta	$f_{ct,fl}$	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
Trac1	6,49	5,55	6,25	4,55	3,5
Trac2	7,4	6,22	7,1	5,85	4,5
Trac3	3,58	2,976	3,24	3,58	3,57

Todos los datos en N/mm^2

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

3.8.2 Acero.

Para la fabricación de las ferrallas se usan barras de acero corrugado de calidad B 500 SD de diámetros 12 y 16 mm como armadura longitudinal y diámetros 6 y 8 mm como estribos.

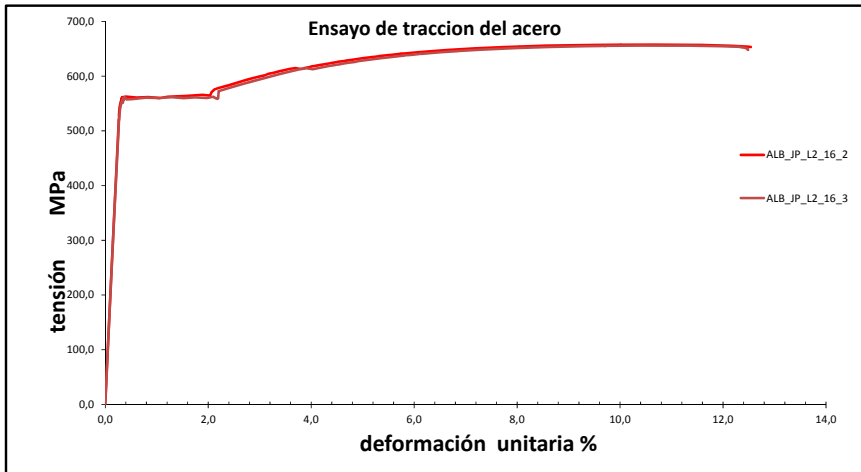
Para el control de calidad del acero según norma (UNE-EN10002-1, 2002) se ensayan dos barras de cada diámetro utilizado de la misma colada que el acero que conforma los dos elementos, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla siguiente (Tabla 9).

Tabla 9 Control de calidad del acero

Diámetro nominal (mm)	16	16	12	12	8	8	6	6
Límite elástico (MPa)	544,51	542,87	523,8	523,5	527,75	522,5	511,4	508,35
Resistencia a tracción f_u (MPa)	648,9	647	647,8	646,8	616,6	615	610,3	608
Relación f_u/f_y	1,19	1,19	1,23	1,23	1,17	1,17	1,19	1,19
Alargamiento rotura (%)	22,5	25,6	27,5	26,7	26,25	27,5	24,6	25,6
Alargamiento bajo carga máxima (%)	12,5	14,38	14	13,33	13,75	13,75	14,6	14,2
Modulo elástico E (MPa)	196311	190295	222382	204993	206998	221132	223552	221505

Y obteniéndose las gráficas de cada ensayo. (Gráfica 1Gráfica 7)

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



Gráfica 7 Ensayo de tracción de los redondos de $\varnothing 16$

3.9 Conclusiones.

Se han examinado todos los condicionantes físicos que afectan a la fabricación de dos elementos de hormigón armado, desde la maquinaria con la que se cuenta hasta el comportamiento que se espera de los elementos para decidir que materiales y que configuraciones geométricas utilizar.

Analizando el diagrama de interacción del hormigón bajo tres hipótesis de armado se selecciona la compuesta por redondos de 12 mm en la cara comprimida y redondos de 16 mm en la cara traccionada. Además se decide una excentricidad de $b/2$.

Mediante el método de Bielas y Tirantes se calcula el refuerzo de las cabezas de los elementos armándose finalmente

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

con 8 estribos de diámetro 8 mm.

Se utiliza un hormigón pre dosificado y corregido con una adición controlada de cemento CEM II 42,5 R que permite conseguir la resistencia y cono deseado, 30 MPa y 680 mm respectivamente.

Además se realiza un control de calidad de los materiales para asegurar que el acero cumple con las especificaciones marcadas en el artículo 32 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008) al igual que el hormigón fabricado se corresponde con el caracterizado.

CAPITULO IV: Ejecución del experimento

4.1 Revisión y reconfiguración de la ferralla.

Todas las ferrallas recibidas se revisan para comprobar que la geometría sea la correcta y se rectifica la posición de barras y estribos que no se encuentren en su posición correcta. Se retiran los estribos sobrantes para adecuar la ferralla al espaciado entre estribos elegido para el ensayo (fig. 28).

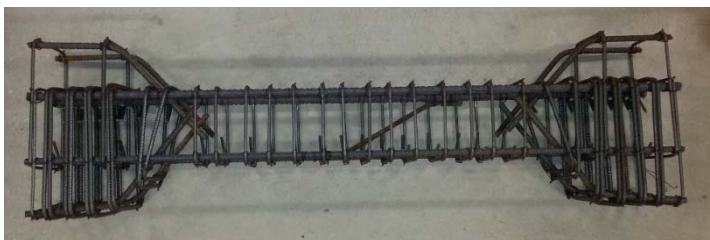


fig. 28 Ferralla aún sin modificar con todos los estribos.

4.2 Instrumentación de la ferralla.

Se instrumentan con bandas extensiométricas de HBM de 120 ohmios y un 0,35% de tolerancia las barras

traccionadas en su sección central y las barras comprimidas en su sección central y a 7,5 centímetros por encima y por debajo de esta en una de las barras comprimidas con bandas extensiométricas. Por último se colocan dos bandas más en los estribos superior e inferior más próximos a la sección central.

Las bandas extensiométricas de las barras comprimidas no se colocan en su posición óptima para la medición de deformaciones, es decir, en paralelo a la flexión de la pieza, si no que se colocan en la cara comprimida de la barra de manera que se detecte un cambio repentino en la medición de la banda extensiométrica en el momento del pandeo.

El plano de deformación del elemento se consigue mediante las bandas de las barras traccionadas y la instrumentación previa al ensayo con bandas extensiométricas de hormigón en la cara comprimida del elemento. Y la deformada con transductores de desplazamiento, apoyados en la cara traccionada del elemento.

El correcto funcionamiento de las bandas extensiométricas depende de su correcta colocación. Esto se consigue siguiendo un proceso de preparación del acero y pegado de las bandas que consiste en:

- Retirar la corruga de la barra de acero en la región en la que se va a pegar la banda en un espacio de unos 15 mm utilizando para ello una sierra radial con un disco de devastar.

- Pulir la zona devastada con una lija circular de mil hojas hasta conseguir una superficie lisa (fig. 29).

- Limpiar la superficie con acetona para retirar restos

de polvo y grasa y asegurar una buena adherencia.

-Fijar de manera temporal la banda a la barra de acero usando celo y evitar el contacto con los dedos de la cara de la banda que va adherida (fig. 30).

-Aplicar una pequeña cantidad del adhesivo proporcionado por el fabricante de las bandas (fig. 31) y usando un trozo de teflón también proporcionado por el fabricante, presionar la banda durante 30 segundos.

-Se aplica la masilla protectora suministrada por el fabricante de las bandas (fig. 32) para protegerla de las agresiones que pueda sufrir durante el transporte y almacenado de la ferralla y el posterior hormigonado del elemento, así como de la humedad (fig. 33).

-Se atan los cables de las bandas extensiométricas con bridas de plástico (fig. 34) para evitar tirones que puedan arrancarlas y se conducen estos cables por el interior de la pieza de manera que no obstruyan el paso del hormigón, esto es especialmente importante en el elemento reforzado con fibras de acero ya que estas tienden a aglutinarse y formar tapones cuando tropiezan con algún obstáculo.

-Se etiqueta cada banda para identificarla una vez esté hormigonado el elemento (fig. 35).

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

-Se agrupan los cables de las galgas y se embolsan para protegerlos durante el hormigonado (fig. 36).



fig. 29 Zona pulida.



fig. 30 Fijación de la banda.



fig. 31 Aplicación del adhesivo



fig. 32 Protector de bandas



fig. 33 Banda protegida



fig. 34 Banda sujeta

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 35 Bandas etiquetadas

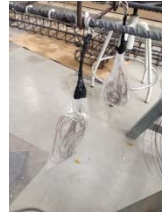


fig. 36 Embolsado de bandas

4.3 Preparación y montaje de encofrados.

Esta fase se realiza ya el día del amasado o el día anterior como muy pronto para que no tenga tiempo el desencofrante de escurrirse.

Se montan las lamas laterales sobre la plancha inferior y se sujetan a esta con sargentos asegurando su verticalidad y asegurando una distancia entre ambas lamas de 40 cm entre caras interiores en toda su longitud. A continuación se le da una capa de desencofrante a la plancha inferior y a las caras interiores de la lamas para asegurar que se cubren las zonas que tendrán un acceso más dificultoso al montar el resto de piezas del encofrado. Se montan las maderas que forman los extremos del elemento y se sujetan mediante un sargento que presiona las dos lamas contra el canto de estas maderas. Seguidamente se presentan las dos piezas trapezoidales sobre la plancha y se sujetan con dos sargentos cada una a la lama con la que está en contacto. Se comprueban las dimensiones y se realizan las correcciones pertinentes (fig. 37).

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

Finalmente se da otra capa de desencofrante sobre las superficies de madera (fig. 38)



fig. 37 Encofrado preparado.



fig. 38 Puesta de desencofrante final.

4.4 Colocación de la ferralla en los encofrados.

Antes de introducir la pieza en el encofrado, se asegura el recubrimiento que deberá tener con la colocación de separadores del tipo ruleta de plástico (fig. 39 y fig. 40). Se introduce la ferralla en el encofrado entre dos operarios y se miden las separaciones y recubrimientos superior (fig. 41) y a cara interior del encofrado así como la nivelación de la pieza. En esta misma fase se preparan las probetas de control de calidad del hormigón. Este control consta de 3 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Además en el elemento reforzado con fibras de acero, se fabrica también una probeta prismática de 15x15x60 cm. (fig. 42).

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA



fig. 39 Separadores de ruleta.



fig. 40 Colocación de los separadores.



fig. 41 Comprobando el recubrimiento



fig. 42 Probetas de control

4.5 Preparación del material para el amasado.

Debido a la elección del material (hormigón pre dosificado ensacado), la preparación de las amasadas es sencilla, limitándose a preparar los sacos del material, el cemento y

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

el agua. Y en el caso del hormigón reforzado se preparan las fibras de acero. (fig. 43)

Para el llenado de un elemento, tres probetas cilíndricas y una probeta prismática, es necesario fabricar 104 litros de hormigón. Para ello se preparan 200 Kg de Sikacrete®-08 SCC, 2 Kg de cemento CEM II 42,5 R, 19,25 Kg de agua y para el elemento con fibras de acero 8,32 Kg de fibras 80/30 Dramix.



fig. 43 Material preparado.

4.6 Amasado del hormigón.

Para el amasado del material el orden a seguir es el siguiente:

-Se vierte el contenido de 8 sacos de Sikacret®-08 SCC en la amasadora y se mezcla durante 1 minuto para romper los terrones que puedan existir y que aparecen por la compresión que sufren los sacos durante su

almacenamiento (fig. 44).

-Se añaden los 2 kilos de cemento y se deja mezclar 1 minuto para una correcta homogenización (fig. 45).

-Se vierte el agua de manera continuada durante 1 minuto (fig. 46) y se deja amasar durante 10 minutos. Este tiempo depende de factores como la temperatura ambiente o la humedad ambiental por lo que se observó que una amasada realizada a las 8:00 am cumplía este tiempo y sin embargo una segunda amasada iniciada a las 10:00 am era necesario amasarla durante 15 minutos.

-A continuación, en el caso del elemento reforzado con fibras de acero, se procede a añadir las fibras vertiéndolas poco a poco para evitar la formación de bolas (fig. 47). Estas bolas aparecen si cae un grupo de fibras trabadas entre ellas que al entrar en contacto con la masa se recubre de la misma como un conjunto impidiendo la entrada de la matriz de hormigón en la bola y en consecuencia ese grupo de fibras no se distribuye y crea una zona débil en el interior del elemento si no se retira. Se deja amasar durante 2 minutos.

-En este momento se saca de la amasadora la cantidad de hormigón suficiente para realizar el ensayo de escurrimiento con el cono de Abrams (fig. 48) y en caso de que el resultado del ensayo sea el esperado, se da por finalizada la operación de amasado (fig. 49)

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 44 Sikacrete®-08 SCC



fig. 45 Vertiendo el cemento

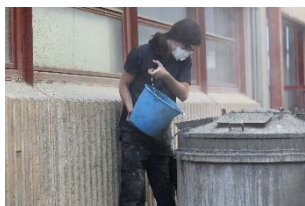


fig. 46 Vertiendo el agua



fig. 47 Añadiendo fibras



fig. 48 Preparando ensayo de escurrimiento.



fig. 49 Midiendo el diámetro

4.7 Puesta en obra y curado del hormigón.

El hormigón se vierte en el interior de un cubilote (fig. 50) y

se traslada a la zona donde se encuentran los encofrados (fig. 51).

Se eleva el cubilote mediante una grúa puente y se ubica sobre la pieza que se va a hormigonar (fig. 52).

Se vierte el hormigón desde una altura de unos 20 centímetros comenzando por la zona central de la pieza (fig. 53) y llenando poco a poco para evitar que se creen coqueas en las zonas más armadas, esto es especialmente importante en el elemento reforzado con fibras de acero ya que estas tienden a aglutinarse en los cierres de los estribos (fig. 54) y es necesario controlarlo y ayudar al movimiento de la masa en caso de ser necesario (fig. 55). Dado que las cabezas de los soportes están especialmente armadas, cuando la masa de hormigón está alcanzando la parte superior de la armadura, se desplaza el cubilote hacia estas y se vierte hormigón hasta nivelar la masa (fig. 56), después se vuelve a la zona central y se termina de verter (fig. 57).

Tras llenar el elemento se procede al llenado de las probetas de control (fig. 58).

Pasadas dos horas del vertido y cuando el hormigón ya ha adquirido la consistencia suficiente, se vierte agua en su superficie y se cubre con plásticos (fig. 59).

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 50 Vertido en cubilote



fig. 51 Transporte del cubilote



fig. 52 Movimiento con grúa puente

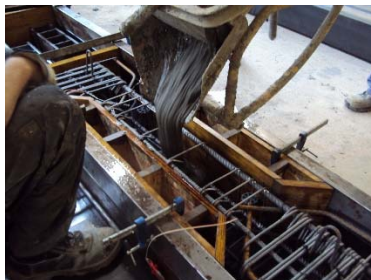


fig. 53 Llenado del encofrado



fig. 54 Acumulación de fibras

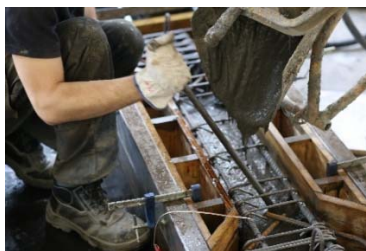


fig. 55 Empujando la masa

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 56 Llenado de las cabezas



fig. 57 Finalizando el vertido



fig. 58 Probetas de control



fig. 59 Curado de las piezas

4.8 Desencofrado.

Superadas las 24 horas de la fabricación del hormigón, se procede al desencofrado del elemento. Para ello se aflojan los sargentos que sujeten todas las piezas y se golpean las maderas y lamas de acero que forman el encofrado con una maza de goma para separarlas del elemento. Una vez ya no están en contacto con él (fig. 60) se procede a moverlo usando para ello la grúa puente con la que se lo traslada hasta la zona

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA

de almacenamiento.



fig. 60 Elemento desencofrado

4.9 Preparación del elemento.

4.9.1 Placas de apoyo del elemento.

La carga no se aplica directamente sobre el elemento pues al flectar podría desplazarse y cambiaría el punto de aplicación de la carga e incluso en el peor de los casos salir expulsado y provocar un accidente. Para asegurar que no varíe el punto de aplicación, se atornillan a las cabezas del elemento dos placas de acero de 800 MPa (fig. 61) con un entalle de sección semicircular que acopla con las placas de apoyo montadas en el pórtico de ensayo (fig. 62).

Para ello se posiciona el elemento sobre dos apoyos (fig. 63), se perforan y se atornillan las placas (fig. 64) con tornillos de diámetro 10 mm y 100 mm de longitud con taco metálico (fig. 65),

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 61 Placas de acero



fig. 62 Apoyos



fig. 63 Preparando el elemento



fig. 64 Placas atornilladas



fig. 65 Tornillo Ø10mm L100mm Broca Ø12mm

4.9.2 Galgas de hormigón.

Se ponen cuatro bandas extensiométricas de hormigón de HBM de 120 ohmios de tolerancia 0,35% en la cara comprimida del elemento. Tres en la sección central en posición vertical que determinan el plano de deformación y otra en

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

posición horizontal con la que se pretende relacionar la degradación del hormigón en la cara comprimida con la aparición del pandeo (fig. 66).

Para adherir las bandas al hormigón se utiliza un adhesivo bicomponente distribuido por el fabricante de las mismas (fig. 67). Se trata de un adhesivo en polvo con catalizador líquido que fragua en un minuto.

Se comienza por marcar la posición de la banda extensiométrica y se limpia la superficie de polvo, se presenta la banda y se sujeta temporalmente con celo. Tras esto se prepara un recipiente con el componente en polvo (fig. 68) y se vierte el catalizador (fig. 69), se remueve la mezcla (fig. 70) y se vierte sobre la superficie del elemento (fig. 71). Usando un film transparente no adherente que proporciona el fabricante del adhesivo se posiciona la banda y se hace presión durante unos segundos (fig. 72 y fig. 73).



fig. 66 Posición de las bandas



fig. 67 Adhesivo

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 68 Dosificando el adhesivo



fig. 69 Vertido del catalizador



fig. 70 Se remueve la mezcla



fig. 71 Vertido del adhesivo



fig. 72 Aplicando presión



fig. 73 Banda pegada.

4.10 Colocación del elemento en el pórtico.

Se coge el elemento con una máquina elevadora y se aproxima al pórtico de ensayo, se posiciona entre los apoyos (fig. 74) y se baja hasta hacer contacto con el apoyo inferior.

En el momento que ya descansa el elemento sobre el apoyo inferior pero aún está en contacto con las palas de la máquina elevadora, se corrige su posición hasta verticalizarlo completamente. Se abre el caudal de acetite que alimenta el gato hidráulico y se permite su desplazamiento hasta que el apoyo superior entra en contacto con la placa de acero del elemento. Como el recorrido de gato hidráulico no se puede recuperar si no se introduce aire comprimido por su válvula secundaria, se puede retirar la máquina elevadora sin riesgo de que el elemento se desplace y caiga.



fig. 74 Posicionando el elemento

4.11 Instrumentación del ensayo.

4.11.1 Transductores de desplazamiento.

Se utilizan 5 transductores de desplazamiento marca Novotechnik modelo TEX-0200 con una capacidad de medir desplazamientos de hasta 200 mm con una resolución de 0,01mm.

Estos captadores se montan con unas nueces en un soporte perforado que se fija al pórtico de ensayo con unos sargentos de manera que queden encarados hacia el elemento y apoyen el extremo del pistón sobre unas placas de metacrilato que se adhieren al elemento con cola termo soldable (fig. 75). Se conectan los cables al equipo de adquisición de datos.



fig. 75 Transductores de desplazamiento.

4.11.2 Transductor de carga.

Para la medición y control de la carga durante el ensayo se utiliza un transductor de presión (fig. 76) marca General Instruments modelo PDCR 4011 con capacidad de medir

hasta 351

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

bares de presión con una precisión del 0,04% del fondo de escala. Este equipo se conecta al grupo de presión (fig. 77) y al equipo de adquisición de datos. Además el grupo de presión dispone de su propio marcador de carga (fig. 78) para poder ser controlado por parte del técnico de laboratorio que lo opera manualmente.



fig. 76 Transductor de carga



fig. 77 Conexión del transductor



fig. 78 Mandos y control del grupo hidráulico

4.11.3 Bandas extensiométricas.

Para un mejor contacto eléctrico de las bandas extensiométricas con el equipo de toma de datos, se ponen en el extremo de los cables unas punteras metálicas. Para

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

ello se retiran 5 mm del recubrimiento plástico del extremo de los cables de la banda extensiométrica, se introduce el cable descubierto en el interior de la puntera metálica y se presiona con un alicate (fig. 79). De esta forma resulta más sencilla y segura la conexión a los cables del equipo de adquisición (fig. 80).



fig. 79 Cables con punteras.



fig. 80 Conexión de las bandas

4.11.4 Cámara fotográfica.

Como parte del estudio con el que colabora este TFG se va a realizar un análisis fotogramétrico de los ensayos. Para ello se monta una cámara fotográfica (fig. 81 y fig. 82) que realizará una toma cada segundo.

Para poder interpretar los datos fotográficos se toman fotografías previas al ensayo a una serie de plantillas que permitirán al software de análisis corregir las deformaciones que provoca la curvatura de la lente en las fotografías.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



fig. 81 Cámara fotográfica

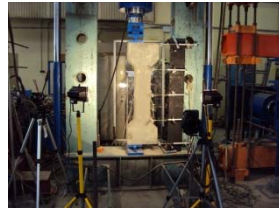


fig. 82 Montaje del soporte gráfico

4.12 Equipo de adquisición de datos.

Para la adquisición de datos se debe configurar el software con los datos de todos los medios que intervienen en la toma de datos, seleccionando para ello las bandas extensiométricas, transductores y gato hidráulico que vamos utilizar.

Asignamos los canales de datos a los que se han conectado los medios de medida y se configuran las gráficas de seguimiento en vivo que se desee observar. Todos los datos se guardan durante el ensayo y se pueden montar graficas con todos ellos por lo que es suficiente para el control del ensayo con visualizar las gráficas que aporten los datos más críticos y aquellos que determinaran la finalización del ensayo (fig. 83). Una vez esta todo programado se puede realizar la toma de ceros y la puesta en marcha de la toma de datos (fig. 84).

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

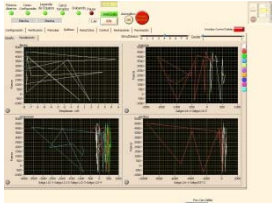


fig. 83 Graficas de seguimiento

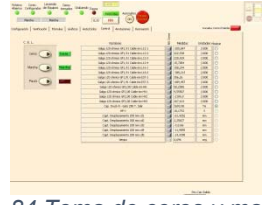


fig. 84 Toma de ceros y marcha

4.13 Ensayo.

Se ensayan dos elementos, ambos fabricados con los mismos materiales pero añadiendo a uno de ellos fibras metálicas.

Elemento	Identificación	Resistencia	Separación estribos	Fibra metálica
S01	H30ST30	30MPa	30 cm	0 kg/m ³
S02	H30ST30F80	30MPa	30 cm	80 kg/m ³

4.13.1 Proceso de carga.

La carga aplicada al elemento se controla de forma manual manteniendo una velocidad de aproximadamente 1kN/s.

Se controla visualmente la cara traccionada del elemento y se anota la aparición de fisuras, tanto su situación como a que carga han aparecido. Se detecta un aumento del número de fisuras en la cara traccionada del elemento S02 respecto al S01, pero de menor abertura, confirmando que

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

las fibras metálicas distribuyen mejor la fisuración (fig. 85).



fig. 85 Fisuras en cara traccionada de ambos elementos

A partir del momento en el que se alcanza la carga máxima, se presta especial atención a la cara comprimida y a las gráficas en las que aparecen los datos de las bandas del acero sometido a compresión ya que se entra en la situación a partir de la cual puede aparecer el pandeo de las barras comprimidas.

El pandeo se detecta inicialmente en las gráficas, en las que se aprecia un brusco cambio de tendencia en la dirección de la deformación de las bandas extensiométricas, pasando

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

de estar comprimidas a, perder compresión. Cuando se llega a este punto, en el propio soporte aparece en la zona del pandeo una rotura de la capa de recubrimiento de hormigón que rodea la barra longitudinal. En este punto se detiene el ensayo (fig. 86).

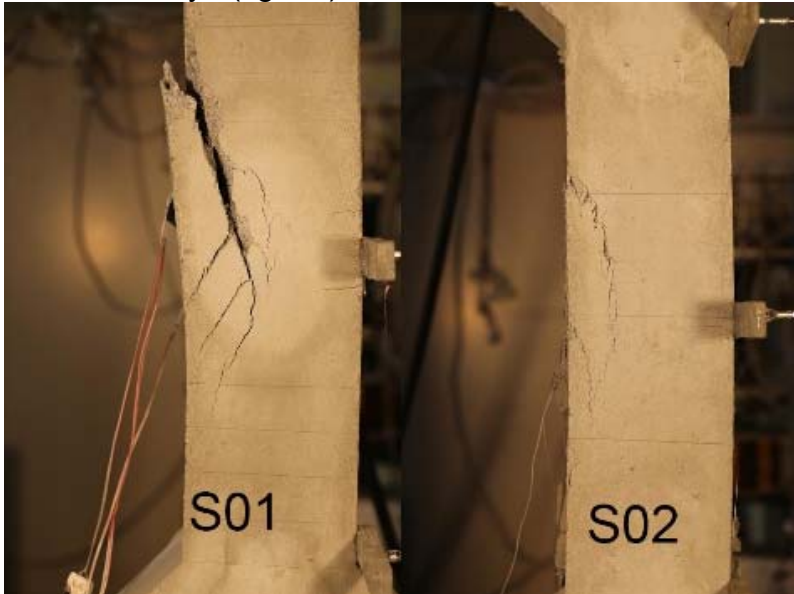


fig. 86 Final del ensayo.

4.14 Gestión de residuos.

Los residuos generados se dividen en dos categorías, hormigón armado y cables eléctricos. Para ambos productos se dispone de un contenedor habilitado para su depósito en las instalaciones utilizadas que posteriormente

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

son retirados por una empresa especializada (fig. 87).



fig. 87 Contenedores para residuos

4.15 Conclusiones.

Se han fabricado dos elementos de hormigón armado de similares características geométricas pero con distinta dosificación del hormigón. Se han instrumentado con bandas extensiométricas en las secciones más propicias a sufrir el efecto de pandeo y tras 28 días se han montado en el pórtico de ensayo donde se terminan de instrumentar con captadores de desplazamiento para controlar la flecha y se han ensayado sometiéndolos a una carga esviada para provocar la aparición del pandeo. Al terminar los ensayos se separan los cables del hormigón armado y se retiran a los contenedores de residuos apropiados.

CAPITULO V: Análisis de resultados

5.1 Determinación experimental de las tensiones y deformaciones de pandeo de las armaduras comprimidas.

De los datos obtenidos durante el ensayo se extraen las gráficas correspondientes a las bandas extensiométricas puestas en los elementos (fig. 88) siendo su nomenclatura la siguiente:

Las designadas como L12 se corresponden a las bandas colocadas en las barras comprimidas y las designadas como L16 a las colocadas en las barras traccionadas. Las bandas L12-2 y L12-4 están colocadas en la sección central de cada una de las barras comprimidas y las L12-1 y L12-3 7,5 cm por encima y por debajo de la L12-2 respectivamente. Las Bandas L16-1 y L16-2 se encuentran ambas en la sección central de cada una de las barras traccionadas.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

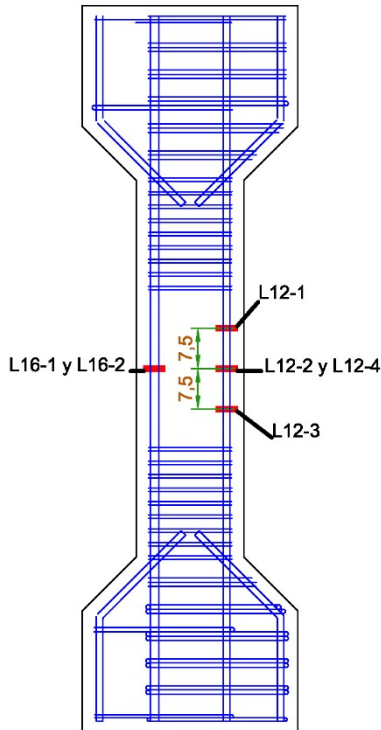
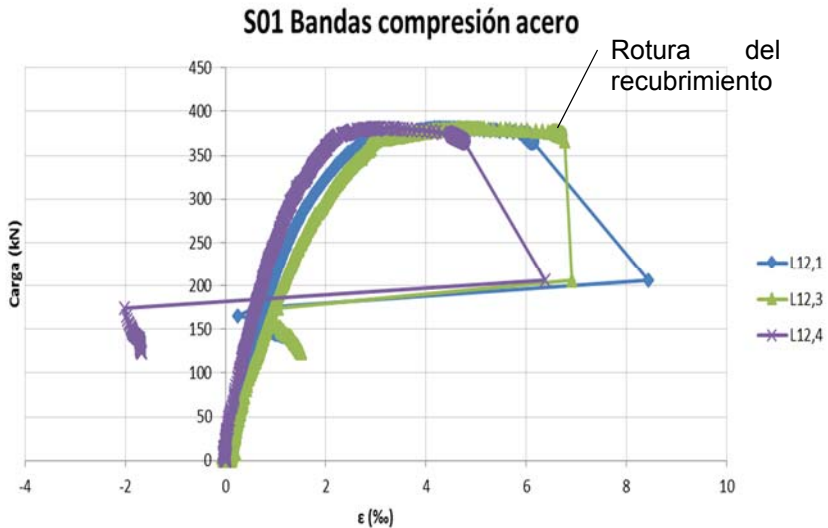


fig. 88 Posición de las bandas extensiométricas.

En la gráfica correspondiente a las barras comprimidas del elemento S01, (Gráfica 8) se observa como tras alcanzar la carga máxima, esta se estabiliza hasta alcanzar la máxima deformación del hormigón, momento en el que se produce la rotura del recubrimiento de hormigón cayendo bruscamente la carga hasta la aparición del pandeo que se aprecia por la repentina pérdida de compresión en las

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

bandas extensiométricas. Observamos como en realidad se produce un aumento de las deformaciones entre la carga de rotura del recubrimiento y la aparición del pandeo de la armadura longitudinal. Esto se debe a la cinemática de las fuerzas que actuaban en el recubrimiento y que son reconducidas al núcleo de hormigón y barras comprimidas.



Gráfica 8 Bandas en cara comprimida S01

En las siguientes imágenes se observa como entre el momento de máxima carga (381 kN, tiempo 11:42:26) y el momento previo al colapso (366 kN, tiempo 11:42:51) no se aprecian daños en el recubrimiento de la cara comprimida

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

pero en menos de un segundo se produce la rotura del recubrimiento e inmediatamente se produce el pandeo de la armadura longitudinal (165 KN, tiempo 11:42:52) habiéndose alcanzado una deformación del 6‰(fig. 89).

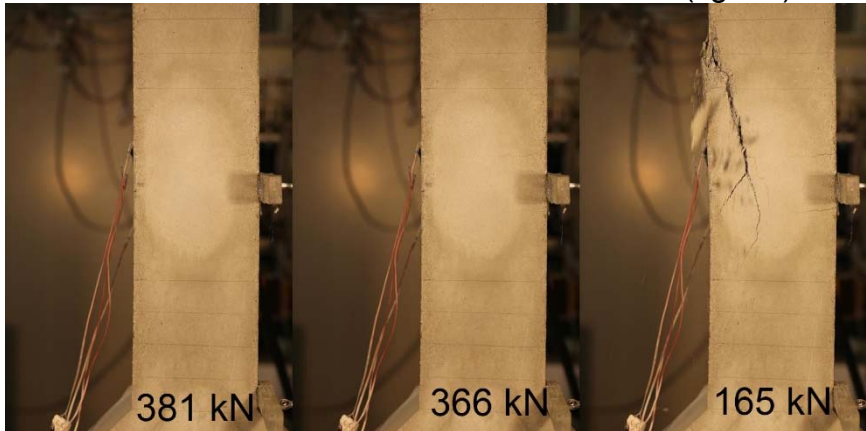
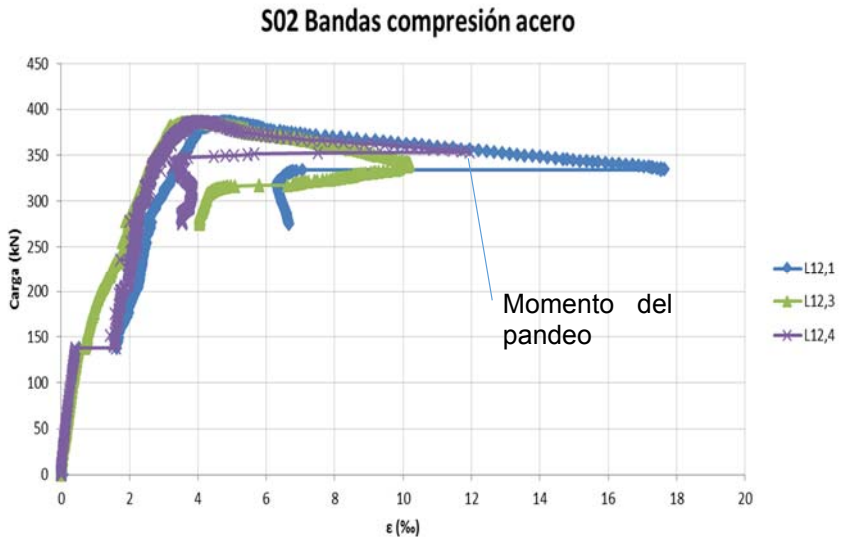


fig. 89 Instante de la rotura del elemento S01

Sin embargo, al estudiar los resultados del ensayo del elemento S02 reflejados en la siguiente gráfica (Gráfica 9) se observa como tras alcanzarse la carga máxima, esta cae a un ritmo lento mientras la deformación aumenta hasta en dos veces y media más que en el elemento S01 sin poderse apreciar el momento de la rotura del recubrimiento que se sabe se produjo alrededor del 4 ‰, en el momento del pandeo no se produce una caída brusca de la carga si no que se produce de una forma más lenta, todo ello debido a la acción de las fibras metálicas.

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA



Gráfica 9 Bandas en cara comprimida S02

En las siguientes imágenes (fig. 90) se ve como al igual que en el elemento S01 entre el momento de carga máxima (386 KN, tiempo 11:30:36) y el momento en el que se detecta el pandeo (354 KN; tiempo 11:31:58) no se aprecian daños en la cara comprimida del hormigón, pero a diferencia del elemento S01, la deformación es del 12‰ y aun habiéndose producido el pandeo, la abertura de la fisura se produce de manera lenta como se aprecia entre los siguientes instantes (350 KN, tiempo 11:32:02) (288 KN, tiempo 11:34:44).

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

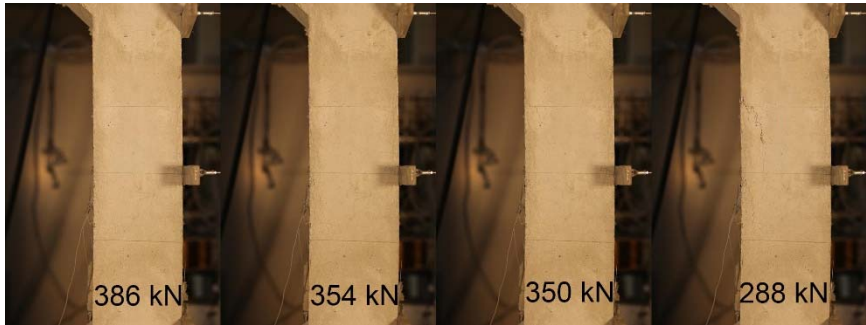


fig. 90 Proceso de rotura del elemento S02

5.2 Conclusiones.

Se ha determinado que el añadir un equivalente al 1% del volumen total del hormigón en fibras metálicas 80/30 a un soporte de hormigón armado, conlleva un aumento de la ductilidad alcanzando unas deformaciones alrededor de 2,5 veces mayores antes de la aparición del pandeo de la armadura longitudinal pasando de un 4‰ de deformación en el acero a un 12 ‰. Además se reduce el efecto del pandeo sobre el soporte minimizándose los daños visibles en el hormigón.

También se ha comprobado que no es hasta que se rompe el recubrimiento de hormigón cuando aparece el pandeo por lo que en el soporte S02 al alcanzar la tensión de rotura del hormigón en el recubrimiento, como se ponen a trabajar las fibras de acero e impiden su rotura y el soporte sigue deformándose sin pandear la armadura longitudinal.

CAPITULO VI: Aplicación práctica

6.1 Introducción.

Con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, se someterá a ambos soportes a una situación hipotética de sismo aplicando el método simplificado para la edificación de la norma sismo resistente NCSE-02 (Ministerio de fomento, 2009) y bajo unas situaciones de carga preestablecidas.

6.2 Ductilidad.

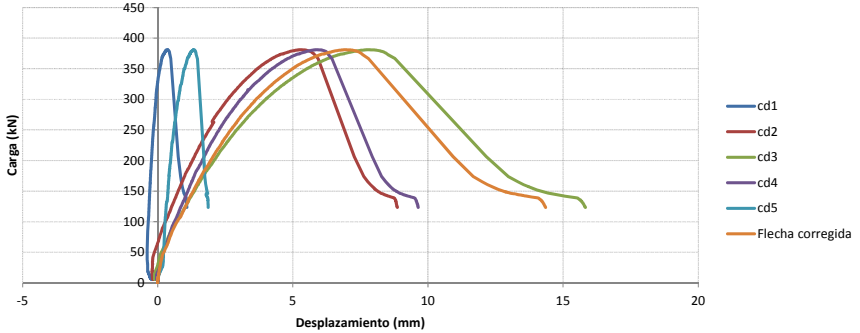
Para comprobar el comportamiento de los dos elementos ensayados es necesario calcular a partir de los resultados de los ensayos la ductilidad (μ) que poseen. Para ello se adopta un criterio de cálculo de la ductilidad en desplazamiento que se calcula dividiendo el desplazamiento último (Δ_u) que es la flecha tras una caída del 20% de la carga máxima alcanzada, por desplazamiento elástico (Δ_ϵ) que es la flecha alcanzada al 75% de la carga de rotura del hormigón o al 90% del límite elástico de la armadura traccionada.

Se analizan los datos obtenidos para el soporte S01 en las tablas y graficas (Gráfica 10) y se comprueba que el elemento se rompe sin llegar a bajar la carga ese 20% por lo que se utiliza para el Δ_u la flecha en el momento de la rotura. Y para la Δ_ϵ se utiliza la flecha en el momento en que la armadura traccionada alcanza el 90% de su límite

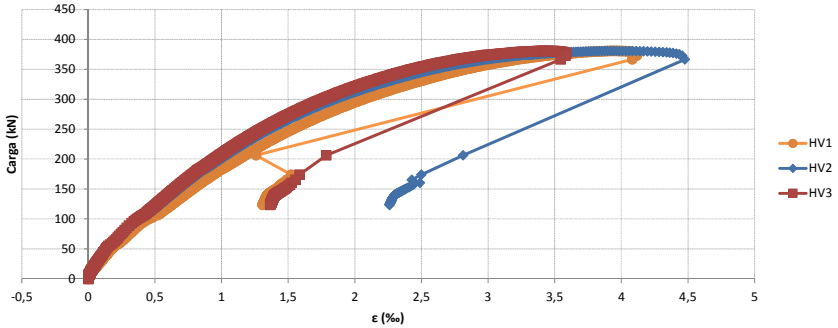
**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

elástico por ser de las dos posibilidades la que resulta más desfavorable.

Carga-Captadores de deformada.

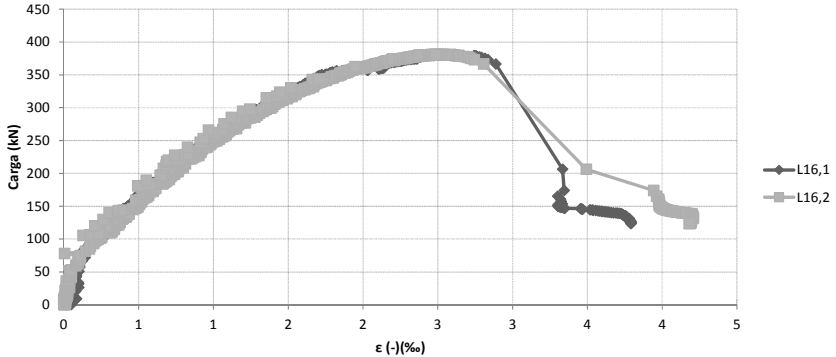


Carga-Galgas de hormigón



**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

Carga-galgas armadura traccionada.



Gráfica 10 Graficas obtenidas del ensayo S01

Para obtener los desplazamientos se resta al captador central la media de los dos captadores inmediatamente superior e inferior ya que estos están justo en el encuentro entre las cabezas y el cuerpo del soporte y solo interesa la flecha del mismo, no los desplazamientos derivados de la geometría del ensayo. Se trata de una aproximación aceptable a la flecha real del elemento. Esto da como datos para el cálculo de ductilidad:

$$\Delta_U = 2,85cm$$

$$\Delta_{\varepsilon y} = 1,68cm$$

De donde se obtiene:

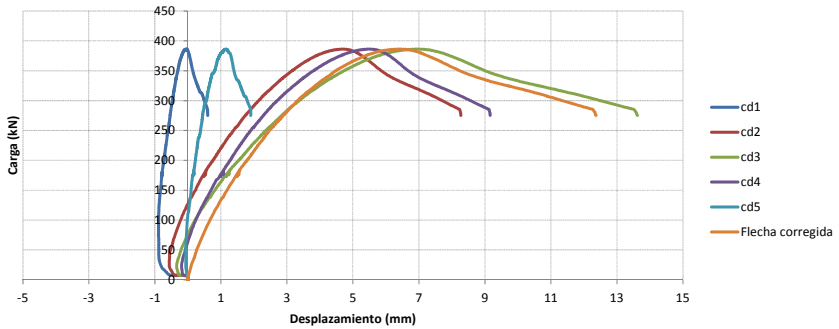
$$\mu_{S01} = \frac{\Delta_U}{\Delta_{\varepsilon y}} = \frac{2,85}{1,68} = 1,54$$

Exactamente con los mismos criterios se calcula la

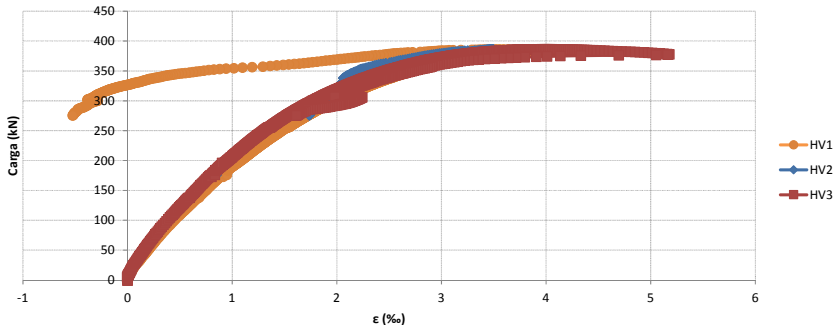
**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

ductilidad del soporte S02 extrayendo los datos de las gráficas asociadas a su ensayo (). En este soporte, sí que baja la carga más del 20% sin colapsar sin embargo para el dato de $\Delta \epsilon$ tan solo se cuenta con la flecha al 75% de la rotura del hormigón ya que la armadura traccionada no alcanza el 90% de su límite elástico.

Carga-Captadores de deformada.

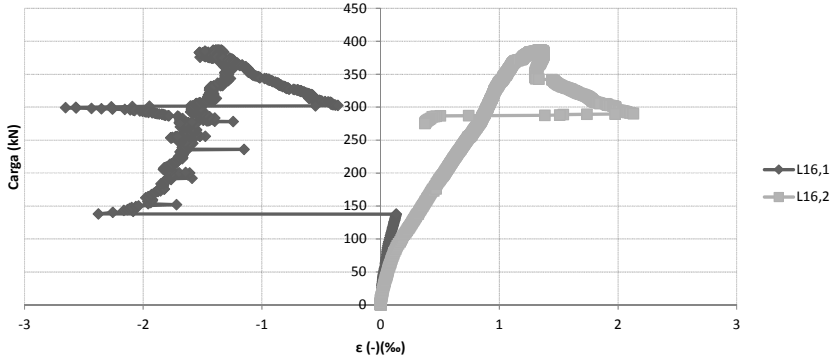


Carga-Galgas de hormigón.



ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA

Carga-Galgas armadura traccionada.



De modo que los datos obtenidos y corregidos como en el soporte anterior son:

$$\Delta_U = 4,08cm$$

$$\Delta_{\varepsilon_y} = 0,89cm$$

De donde se obtiene:

$$\mu_{S02} = \frac{\Delta_U}{\Delta_{\varepsilon_y}} = \frac{4,08}{0,89} = 4,58$$

6.3 Simulación.

Para llevar a cabo la simulación de comportamiento de los dos elementos ensayados, se deben determinar los parámetros de contorno.

Se sitúa la simulación en Lorca (Murcia) y se deciden unas cargas plausibles que afecten al elemento:

Cargas permanentes 500 KN.

Sobrecarga de uso 150 KN.

Cortante en cabeza del soporte 20 KN.

Se determina además que solo hay un forjado sobre el soporte y que se trata de una estructura formada por pórticos de hormigón armado sin colaboración de pantallas rigidizadoras.

Con estas condiciones procedemos a aplicar el método simplificado de cálculo para los casos más usuales de edificación del artículo 3.7 de la norma NCSE-02 (Ministerio de fomento, 2009).

Primero se comprueba el número de modos de vibración a considerar para lo cual se debe calcular el periodo fundamental del edificio que según nuestras condiciones y el artículo 3.7.2.2 de la NCES-02 es:

$$T_F = 0,09n = 0,09s$$

Al ser $T_F \leq 0,75s$, solo se considerará el primer modo de vibración. Por lo que T_i es:

$$T_i = \frac{T_F}{2 \cdot i - 1} = \frac{0,09}{2 \cdot 1 - 1} = 0,09s$$

Se calcula ya la fuerza sísmica equivalente F_{ik} , correspondiente a la planta 'k' y el modo de vibración 'i' que viene dada por:

$$F_{ik} = S_{ik} \cdot P_k$$

Donde P_k corresponde a las cargas de la planta 'k' y S_{ik} es un coeficiente adimensional definido por:

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

$$S_{ik} = (a_c / g) \cdot \alpha_i \cdot \beta \cdot \eta_{ik}$$

Se calcula la aceleración de cálculo a_c según la NCSE-02 artículo 2.2:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Para la ciudad de Lorca según el anejo de la norma se le asigna una aceleración básica a_b de 0,12g y se considera el edificio de importancia norma por lo que ρ es 1. Para el coeficiente de amplificación del terreno S, al ser $0,1g < \rho \cdot a_b < 0,4g$, entonces:

$$S = \frac{C}{1,25} + 3,33 \left(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{C}{1,25} \right)$$

C viene definido según el tipo de terreno que en la ciudad de Lorca es de manera generalizada de roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Es decir de tipo II por lo que el valor de C es de 1,3.

$$S = \frac{1,3}{1,25} + 3,33 \left(1 \cdot \frac{0,12g}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{1,3}{1,25} \right) = 1,037$$

$$a_c = 1,037 \cdot 0,12g = 0,1244g$$

El espectro de respuesta α_i según el artículo 2.3:

$$\text{Si } T_i < T_A; \alpha_i = 1 + 1,5 \cdot \left(\frac{T_i}{T_A} \right) = 1 + 1,5 \cdot \left(\frac{0,09}{0,13} \right) = 2,038$$

Coficiente de respuesta β según artículo 3.7.3.1:

$$\beta = \frac{V}{\mu}$$

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA

Donde $V = \left(\frac{5}{\Omega}\right)^{0.4}$ siendo Ω el 4% al considerar la estructura diáfana.

$$V = \left(\frac{5}{4}\right)^{0.4} = 1,0934$$

Se puede calcular ahora la β de los dos elementos ensayados siendo:

$$\beta_{S01} = \frac{V}{\mu_{S01}} = \frac{1,0934}{1,54} = 0,71$$

$$\beta_{S02} = \frac{V}{\mu_{S02}} = \frac{1,0934}{4,58} = 0,24$$

Para el cálculo del factor de distribución η_{ik} según el artículo 3.7.3.2 y teniendo en cuenta que $i=1$; $k=1$; $n=1$, se tiene que:

$$\eta_{11} = 1$$

Por lo tanto S_{ik} queda:

$$S_{11} = (a_c / g) \cdot \alpha_1 \cdot \beta_{S01} \cdot \eta_{11} = \left(\frac{0,1244g}{g}\right) \cdot 2,038 \cdot 0,71 \cdot 1 = 0,18$$

$$S_{11} = (a_c / g) \cdot \alpha_1 \cdot \beta_{S02} \cdot \eta_{11} = \left(\frac{0,1244g}{g}\right) \cdot 2,038 \cdot 0,24 \cdot 1 = 0,06$$

Así que finalmente obtenemos la fuerza sísmica equivalente para ambos elementos según su ductilidad.

Para μ_{S01} :

$$F_{11} = 0,18 \cdot 650 \text{ KN} = 117 \text{ KN}$$

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA

Para μ_{S02} :

$$F_{11} = 0.06 \cdot 650 \text{ KN} = 39 \text{ KN}$$

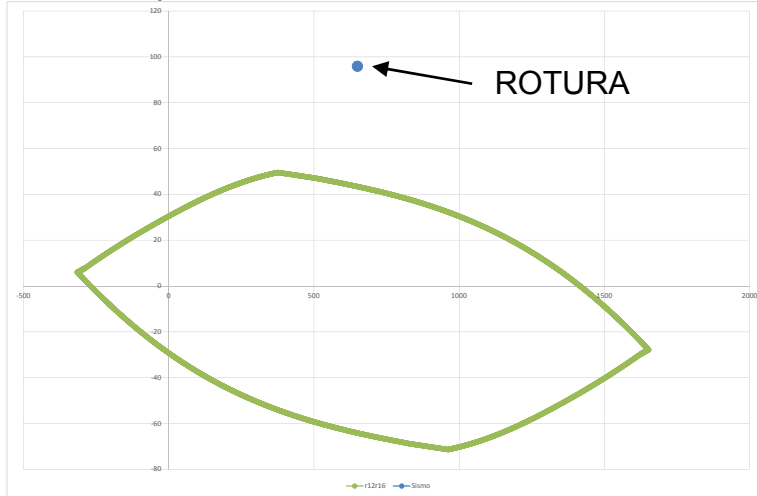
6.4 Resultado final.

Se comprueba finalmente que sucede en los elementos ensayados al someterlos a las fuerzas sísmicas calculadas.

Aplicando la fuerza obtenida para el elemento de hormigón convencional más el cortante de nuestra hipótesis se obtiene un momento de:

$$M_{S01} = (117 + 20) \cdot 0,7 = 95.9 \text{ KN}\cdot\text{m}$$

Sin olvidar que la carga axial del soporte estaba establecida en 650 KN se observa en la siguiente grafica (Gráfica 11) como el soporte esta en rotura.



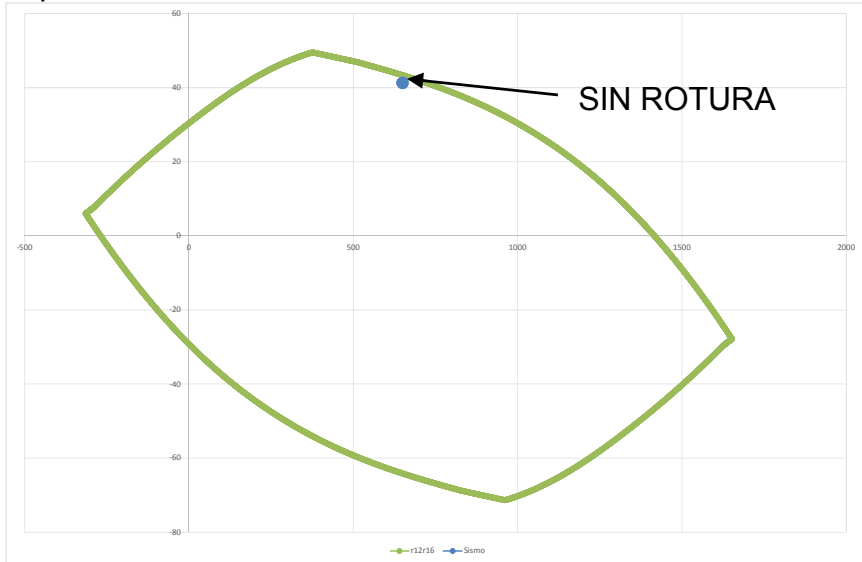
Gráfica 11 Comprobación de sección del soporte S01.

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

Haciendo lo mismo con el soporte reforzado con fibras de acero se obtiene un momento de:

$$M_{S02} = (39 + 20) \cdot 0,7 = 41,3 \text{KN}\cdot\text{m}$$

Y observamos en la siguiente grafica (Gráfica 12) que el soporte se encuentra en una situación resistente.



Gráfica 12 Comprobación de sección del soporte S02

6.5 Conclusiones.

Se ha realizado una simulación de situación de sismo aplicando la norma sismorresistente NCSE-02 (Ministerio de fomento, 2009). Para ello se han creado unas condiciones de contorno y se ha aplicado el método de cálculo simplificado para edificación de dicha norma. Los datos obtenidos se han añadido al diagrama de interacción del

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

hormigón creado para este proyecto y se concluye que sin lugar a dudas la adición de fibras al hormigón convencional mejora lo suficiente la ductilidad como para minorar la fuerza sísmica de diseño un 50%.

CAPITULO VII: Organización

7.1 Introducción.

Se planifica el proceso experimental antes de su inicio para evitar solapes en las tareas en que se divide e impedir retrasos que dificulten el normal funcionamiento del laboratorio y que cualquier imprevisto pueda rápidamente ser solucionado encajándolo dentro del programa.

Para ello se identifican las tareas que intervienen en el programa experimental y se crea un diagrama de Gantt donde quedan reflejadas las fechas de ejecución de dichas tareas así como su duración estimada y se presenta en la siguiente tabla (Tabla 10).

ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA

Tabla 10 Diagrama de Gantt.

Tareas	Duración en días	Junio																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Caracterización del hormigón (fabricación)	2	x	x																													
Caracterización del hormigón (rotura)	2									x	x																					
Fabricación de los encofrados	1								x																							
Ferrallado S01	0,5												x																			
Instrumentación ferralla S01	0,5												x																			
Ferrallado S02	0,5													x																		
Instrumentación ferralla S02	0,5														x																	
Montaje encofrados S01	0,33															x																
Encofrado ferralla S01	0,33																x															
Preparar material amasada S01	0,33																	x														
Hormigonado S01	1																		x													
Curado S01	7																			x	x	x	x	x	x							
Desmoldo probetas acompañamiento S01	0,5																				x											
Desencofrado S01	0,5																					x										
Montaje encofrados S02	0,33																						x									
Encofrado ferralla S02	0,33																						x									
Preparar material amasada S02	0,33																							x								
Hormigonado S02	1																								x							
Curado S02	7																									x	x	x	x	x	x	
Desmoldo probetas acompañamiento S02	0,5																														x	
Desencofrado S02	0,5																															x

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

Tareas	Duracion en dias	Julio																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Adecuación del pórtico	1	x																															
Ensayo control del acero	1		x																														
Colocación en pórtico de S01	0.5																	x															
Instrumentación elemento S01	0.5																x																
Ensayo S01	0.5																		x														
Desmontaje y vertido S01	0.25																			x													
Rotura probetas control S01	0.25																				x												
Colocación en pórtico de S02	0.5																																
Instrumentación elemento S02	0.5																																
Ensayo S02	0.5																																
Desmontaje y vertido S02	0.25																																
Rotura probetas control S02	0.25																																

7.2 Conclusiones.

Una vez se decide que elementos se van a fabricar y qué se necesita para ello, se realiza la clasificación de tareas y se diseña un diagrama de Gantt que permite mantener el control sobre los tiempos de ejecución del proyecto.

CAPITULO VIII: Presupuestos

8.1 Introducción.

Se procede al cálculo y presentación de las tablas presupuestarias de este proyecto en las que se muestran los costes de todo el proceso experimental, para lo cual se han utilizado las bases de datos de precios públicas del IVE (Instituto Valenciano de la Edificación) además de precios directos de los fabricantes de ciertos componentes.

8.2 Tablas presupuestarias.

Tabla 11 Tablas con el presupuesto del proyecto.

Acero	Kg de barras de acero B500 SD de \varnothing 6, 8,12 y 16 mm, corrugado, para armadura principal, refuerzos y cercos. Incluso doblado y atado.							
	Nº de barras	\varnothing (mm)	Longitud (m)	Kg/m	Kg totales	€/Kg	Importe	
Cercos	20	6	0,420	0,250	2,100	0,85	1,79	
Cercos	8	6	0,940	0,250	1,880	0,85	1,60	
Cercos	8	8	0,960	0,395	3,034	0,85	2,58	
Cercos	4	8	0,846	0,395	1,337	0,85	1,14	
Cercos	24	8	0,956	0,395	9,063	0,85	7,70	
Armado pilar	4	12	1,310	0,885	4,637	0,85	3,94	
Armado pilar	4	16	1,310	1,570	8,227	0,85	6,99	
Armado cabezas	16	12	0,428	0,885	6,060	0,85	5,15	
TOTAL								30,89 €

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

Hormigon S02	m ³ de hormigon autocompactante reforzado con fibras metalicas.			
	ud.	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
Sikacrete 08 SCC	t	1291,00	1,923	2482,593
CEM II 42,5 R	t	98,11	0,019	1,889
Fibra metalica dramix 80/30	Kg.	1,60	80	128
Agua	Kg.	1,10	185	203,500
Peón	h.	19,87	3	59,610
Oficial de 1ª	h.	20,80	3	62,400
Hormigonera electrica	h.	1,40	1	1,400
Costes directos complementarios	%	2939,39	0,020	58,788
Beneficio industrial	%	2998,18	0,030	89,945
TOTAL				3.088,125 €

Hormigon S01	m ³ de hormigon autocompactante .			
	ud.	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
Sikacrete 08 SCC	t	1291,00	1,923	2482,593
CEM II 42,5 R	t	98,11	0,019	1,889
Agua	Kg.	1,10	185	203,500
Peón	h.	19,87	0,5	9,935
Oficial de 1ª	h.	20,80	0,5	10,400
Hormigonera electrica	h.	1,40	1	1,400
Costes directos complementarios	%	2709,72	0,020	54,194
Beneficio industrial	%	2763,91	0,030	82,917
TOTAL				2.846,828 €

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

Soporte S01	u. Fabricacion soporte de hormigon armado. Incluso instrumentación del acero, rectificado del armado, colocación en el encofrado, hormigonado y limpieza.			
	ud.	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
Oficial de 1ª	h.	20,80	2,5	52,000
Peón	h.	19,87	2,5	49,675
Hormigon	m ³	2846,83	0,105	298,917
Acero B500SD	Kg.	18,17	0,850	15,445
Encofrado	m ²	25,00	4	100,000
Bandas extensiométricas	u.	10,00	8	80,000
Medios auxiliares	%	596,04	0,020	11,921
Costes directos complementarios	%	607,96	0,020	12,159
Beneficio industrial	%	620,12	0,030	18,603
TOTAL				638,720 €

Soporte S02	u. Fabricacion soporte de hormigon armado reforzado con fibras metalicas. Incluso instrumentación del acero, rectificado del armado, colocación en el encofrado, hormigonado y limpieza.			
	ud.	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
Oficial de 1ª	h.	20,80	2,5	52,000
Peón	h.	19,87	2,5	49,675
Hormigon	m ³	3088,13	0,105	324,253
Acero B500SD	Kg.	18,17	0,850	15,445
Encofrado	m ²	25,00	4	100,000
Bandas extensiométricas	u.	10,00	8	80,000
Medios auxiliares	%	621,37	0,020	12,427
Costes directos complementarios	%	633,80	0,020	12,676
Beneficio industrial	%	646,48	0,030	19,394
TOTAL				665,870 €

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

Ensayo	u. Ensayo de soporte sometido a flexo compresión. Incluso montaje en pórtico, instrumentación, toma de datos, retirada y limpieza.			
	ud.	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
Técnico de laboratorio	h.	20,80	2,5	52,000
Técnico de apoyo	h.	19,87	2,5	49,675
Amortizacion pórtico	%	15000,00	0,004	60,000
Amortizacion equipos de medida	%	6000,00	0,020	120,000
Medios auxiliares	%	281,68	0,020	5,634
Costes directos complementarios	%	287,31	0,020	5,746
Beneficio industrial	%	293,05	0,030	8,792
			TOTAL	301,846 €

Ensayos de control de calidad	u. Ensayos realizados al hormigón endurecido y a muestras del acero utilizado en el armado. Incluso toma de las muestras.			
	ud.	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
Ensayo según UNE EN 12390-3, 2003 de 1 probeta cilíndrica.	u	27,00	2,0	54,000
Ensayo según UNE-EN14651, 2007 de 1 probeta prismática.	u	32,00	3,0	96,000
Ensayo según UNE-EN10002-1, 2002 de 1 barra de acero corrugado.	u	15,00	4,000	60,000
Medios auxiliares	%	210,00	0,020	4,200
Costes directos complementarios	%	214,20	0,020	4,284
Beneficio industrial	%	218,48	0,030	6,555
			TOTAL	225,039 €

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

Resumen del proyecto	Fabricacion y ensayo de 2 soportes de hormigón armado sometido a flexo compresión.			
	ud.	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
Soporte S01	u	638,72	1	638,720
Soporte S02	u	665,87	1	665,870
Ensayos control de calidad	u	225,04	2	450,077
Ensayo	u	301,85	2	603,693
TOTAL				2.358,360 €

8.3 Conclusiones.

El precio final de proceso experimental de este proyecto asciende a 2.358,26 €. Si bien es cierto que el hormigón pre dosificado fue proporcionado por la empresa Sika de forma gratuita. Además el hormigón se distribuye en sacos de 25 Kg. lo que aumenta su precio, por lo que no es representativo del coste real de 1 m³ de un hormigón convencional reforzado con fibras metálicas cuyo precio es inferior a los 70 €. Además el personal dedicado al proyecto no tenía una dedicación exclusiva al mismo, si no que debía realizar otras tareas relativas a sus puestos por lo que los tiempos de los operarios se han estimado de manera aproximada.

CAPITULO IX: Conclusiones

9.1 Introducción.

En este capítulo se expone lo más destacable de los apartados que conforman este proyecto junto con las conclusiones personales sobre el mismo y las líneas de trabajo futuras.

9.2 Plan de trabajo y diseño.

Se examinan las condiciones de contorno del proyecto y se realiza un estudio de las geometrías que mejor se adaptan a nuestro objetivo planteando varias hipótesis de cargas y armados. Además se realizan pruebas con el hormigón y se decide modificarlo añadiendo cemento para mejorar su resistencia.

9.3 Ejecución del experimento.

Se modifican las ferrallas genéricas de que se dispone y se instrumentan. Se fabrican los soportes y se almacenan 28 días. Se ensayan los soportes obteniendo los datos de deformaciones y flecha que se necesitan.

9.4 Análisis de datos.

Se examinan las gráficas obtenidas en el ensayo y se aprecia inmediatamente que la deformación del soporte reforzado con fibras es mucho mayor que la del soporte de hormigón convencional llegando a ser 3 veces mayor.

También se comprueba que se rompe primero el recubrimiento de hormigón y después aparece el pandeo localizado de la armadura longitudinal demostrándose por tanto la colaboración del recubrimiento en impedir el pandeo localizado.

9.5 Organización y presupuestos.

Se estudia el organiza el proyecto para evitar situaciones de colapso por coincidencia de trabajos para lo que se usan conocimientos adquiridos en los estudios de grado de en arquitectura técnica y se crea un diagrama Gantt que se usa como guía de ejecución. Además se crea el presupuesto del coste que tiene este estudio y que asciende a 2358,36 €

9.6 Conclusiones.

Para la consecución de este trabajo fin de grado he tenido que aplicar conocimientos de todos los campos docentes implicados en esta titulación de grado y otros que he adquirido a lo largo del propio TFG.

9.7 Futuras líneas de trabajo.

Actualmente ya están abiertas varias líneas de investigación en esta universidad que estudian el fenómeno del pandeo localizado en la armadura longitudinal utilizando hormigones de alta y ultra alta resistencia además de diferentes configuraciones de armado transversal u otros elementos estructurales como nudos viga-pilar.

CAPITULO X: Bibliografía

- ACI Committee 318. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08), American Concrete Institute. Detroit, E.E.U.U.
- Canovas, M. F. (2011). *Hormigón*. Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Christopher R. Urmson, J. B. (2012). Local buckling analysis of longitudinal reinforcing bars. *Journal of structural engineering*, 10.
- Fernando Rodriguez Lopez, D. P.-S. (1984). Hormigon con la incorporacion de fibras. *Revista de obras publicas*, 779-796.
- Giuseppe Campione, M. F. (2010). Behavior of fiber-reinforced concrete columns under axially and eccentrically compressive loads. *ACI Structural Journal*, 10.
- Javier Pereiro Barceló, J. L. (2014). Modelo mixto para la determinación teórica de la carga crítica de pandeo de las armaduras pasivas en compresión. *ACHE*, (pág. 10).
- Leonardo M. Massone, D. M. (2009). Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections. *Elsevier*, 10.
- Maurizio Papia, G. R. (1988). Inestability of longitudinal bars in reinforced concrete columns. 16.
- Ministerio de Fomento. (2008). EHE-08: Instruccion de hormigon estructural: con comentarios de la Comision Permanente del Hormigon (Ministerio de Fomento, Secretaria General Técnica. España.

- Ministerio de fomento. (2009). *NCSE-02. Norma de construcción sismorresistente: Parte general y edificación*. Centro de publicaciones, Secretaria general técnica, Ministerio de fomento.
- Mohamed M. Talaat, K. M. (2008). *Computational Modeling of Progressive Collapse in reinforced frame structures*. Berkeley: Universidad de California.
- Rajesh Prasad Dhakal, K. M. (2002). Reinforcement stability and fracture of cover concrete in reinforced concrete members. *Journal of structural engineering*, 10.
- UNE83361. (07 de 02 de 2007). Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento.
- UNE-EN10002-1. (2002). Materiales metálicos. Ensayos a tracción. Parte 1. Método de ensayo a temperatura ambiente.
- UNE-EN12390-3. (2003). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3. Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- UNE-EN14651. (2007). Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión.
- Union Europea. (s.f.). EN 1992-1-1 (2004): Eurocode 2. Europa.
- Yazzar. S.A. (Enero de 2000). Estudio de la ductilidad de elementos comprimidos con hormigón de alta resistencia sometidos a cargas cíclicas de flexión, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil,

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

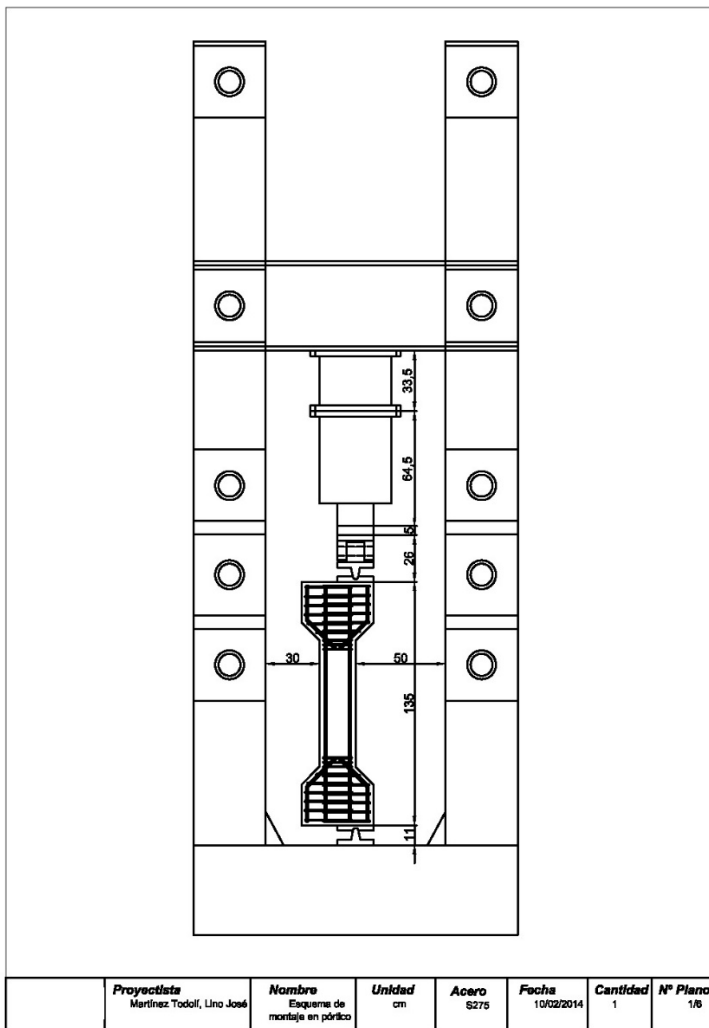
Universidad Politécnica de Valencia. Valencia,
Valencia, España.

Anejo I.

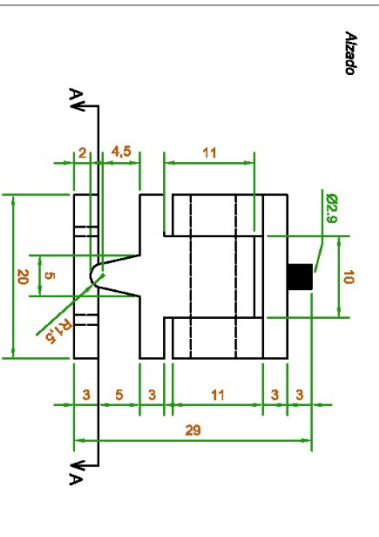
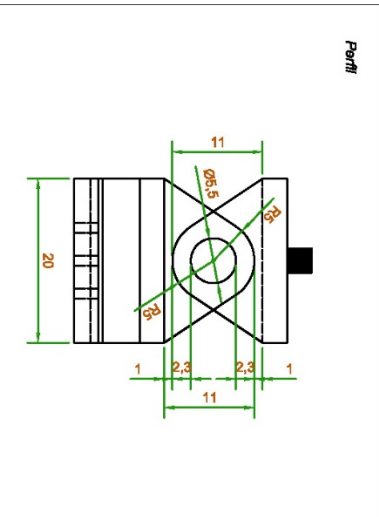
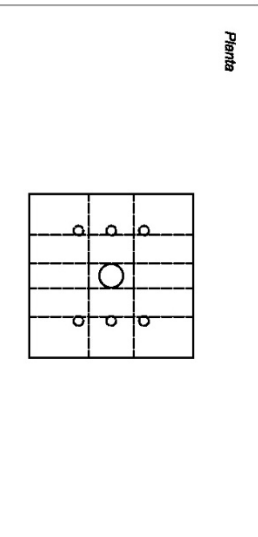
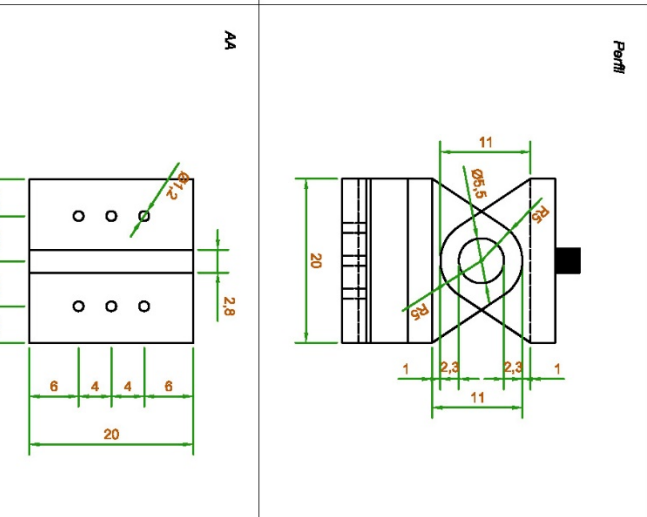
Planos.

Se incluyen a continuación los planos que se han generados para la fabricación de los elementos ensayados, encofrado utilizado y piezas de adecuación del pórtico de ensayo.

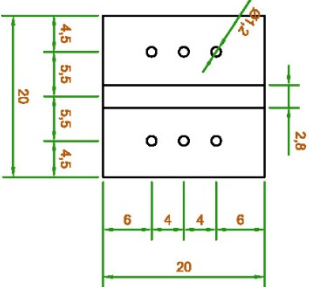
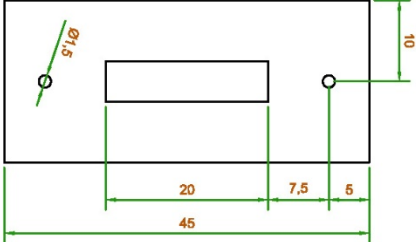
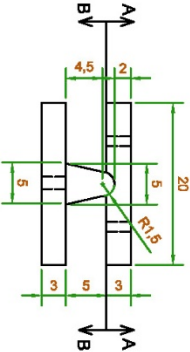
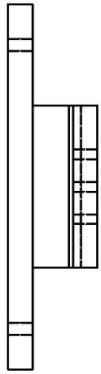
**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**



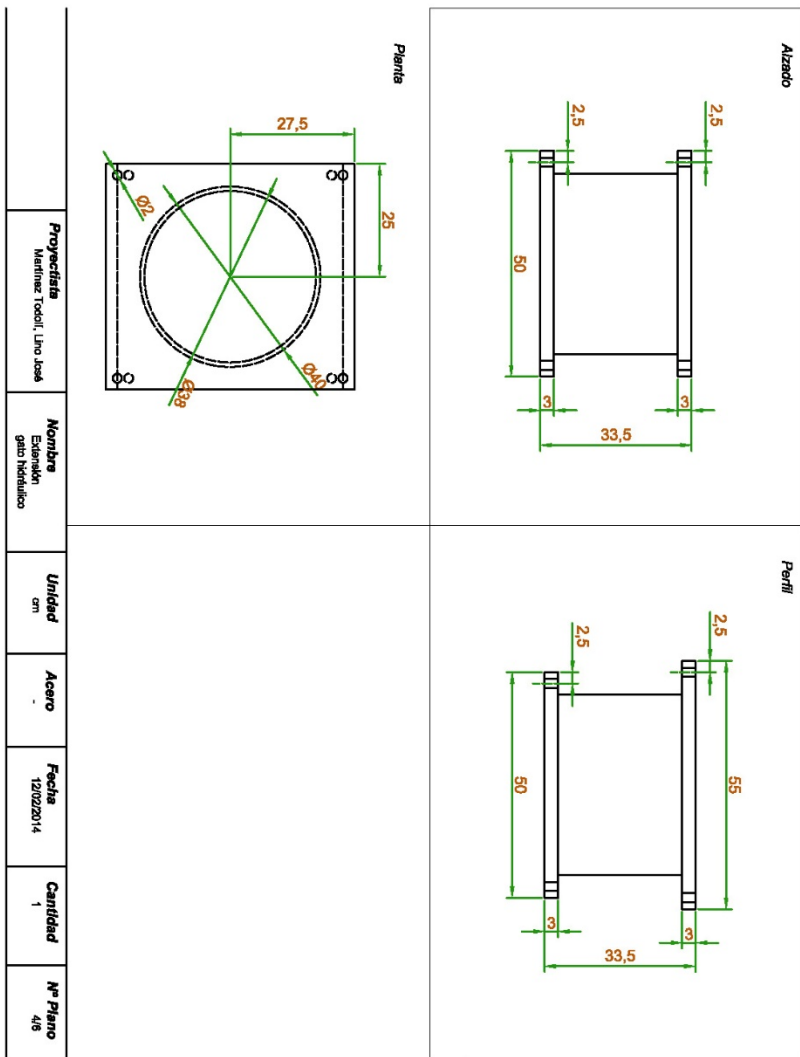
ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA

	Proyectista Martínez Todolí, Lino José	Nombre Acero superior	Unidad cm	Acero Fy ≈ 500 MPa, Fu ≈ 580 MPa	Fecha 1/10/2014	Cantidad 1	Nº Plano 2/6
<p>Alzado</p> 	<p>Perfil</p> 						
<p>Planta</p> 	<p>AA</p> 						

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

<p>Proyektista Martínez Todolí, Lino José</p>	<p>Nombre Acero Infeic</p>	<p>Unidad cm</p>	<p>Acero E_s = 650 MPa, F_u = 900 MPa</p>	<p>Fecha 11/02/2014</p>	<p>Cantidad 1</p>	<p>Nº Plano 36</p>
<p align="right">AA</p> 	<p align="right">BB</p> 	<p align="right">Arzado</p> 	<p align="right">Perfil</p> 			

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**



**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

Proyectista Martínez Todolí, Lino José	Membr. Armadura espartas	Observaciones No se aplican, no se aplican	Unidad cm	Acero B500SD	Fecha 13/03/2014	Cantidad 2	Nº Plano 58
	A		Unids. 2	Ø16			Unids. 2
	B		Unids. 2	Ø12			Unids. 2
	C		Unids. 8	Ø12			Unids. 10
	D		Unids. 10	Ø8			Unids. 14
	E		Unids. 4	Ø6			Unids. 2
	F		Unids. 14	Ø8			Unids. 2
	G		Unids. 2	Ø8			Unids. 2
	H		Unids. 2	Ø8			Unids. 2
	I		Unids. 2	Ø8			Unids. 2
	J		Unids. 2	Ø8			Unids. 2

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

	<p>Proyectorista Martínez Todolí, Lino José</p>	<p>Monobra Montaje Encofrado</p>	<p>Unidad cm</p>	<p>Acero -</p>	<p>Fecha 28/03/2014</p>	<p>Nº Plano 616</p>
<p>La altura es de 20 cm.</p> <p>Hasta ahora se han unido las patas de los encofrados a las lamas con gallos y después se han nivelado las placas de madera de los extremos con un nivel y con pequeños golpes de meza.</p> <p>Bajo recomendaciones de los técnicos, se aplicó el desencofrante una hora antes del ensayo, para que la madera no lo absorbiera.</p>						

Anejo II.

Índice de figuras.

fig. 1 Esquema real de efecto del recubrimiento y de los estribos.....	14
fig. 2 De izquierda a derecha: Joseph Lambot, Barco de hormigón armado de Lambot y Joseph Monier	15
fig. 3 De izquierda a derecha: Estación de bombeo de hormigón, viaducto de Contreras y encofrado trepante.....	16
fig. 4 Patente de A. Berard	17
fig. 5 Cubierta edificio de acceso al Oceanográfico (Valencia) y pasarela sobre el barranco de las Ovejas (Alicante).	18
fig. 6 Variedad de formas de fibras metálicas. (Web Fibrometals).	20
fig. 7 Pórtico de ensayo.....	28
fig. 8 Placas de apoyo inferior y superior.	28
fig. 9 Gato hidráulico.	29
fig. 10 Plancha de encofrar.	30
fig. 11 Turbo mezcladora de eje vertical.....	31
fig. 12 Puente-grúa.....	31
fig. 13 Pilares ensayados.	33
fig. 14 Punto de carga	33
fig. 15 Dominios de deformación del hormigón.	34
fig. 16 Región D.....	38
fig. 17 Esquema de bielas y tirantes.....	39
fig. 18 Extracto de la tabla del diagrama de interacción	40
fig. 19 Elemento montado.	42

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

fig. 20 Encofrado	43
fig. 21 Encofrado montado.	43
fig. 22 Bandas extensiométricas.....	44
fig. 23 Equipo de adquisición de datos.....	44
fig. 24 Transductor de desplazamiento.	44
fig. 25 Fibras de acero.....	47
fig. 26 Sikacrete®-08 SCC	47
fig. 27 Ensayo de escurrimiento.	47
fig. 28 Ferralla aún sin modificar con todos los estribos.....	53
fig. 29 Zona pulida.	56
fig. 30 Fijación de la banda.	56
fig. 31 Aplicación del adhesivo	56
fig. 32 Protector de bandas	56
fig. 33 Banda protegida	56
fig. 34 Banda sujeta.....	56
fig. 35 Bandas etiquetadas	57
fig. 36 Embolsado de bandas	57
fig. 37 Encofrado preparado.....	58
fig. 38 Puesta de desencofrante final.	58
fig. 39 Separadores de ruleta.	59
fig. 40 Colocación de los separadores.	59
fig. 41 Comprobando el recubrimiento	59
fig. 42 Probetas de control	59
fig. 43 Material preparado.	60
fig. 44 Sikacrete®-08 SCC	62
fig. 45 Vertiendo el cemento.....	62
fig. 46 Vertiendo el agua	62
fig. 47 Añadiendo fibras.....	62
fig. 48 Preparando ensayo de escurrimiento.....	62

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCIONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESIÓN RECTA**

fig. 49 Midiendo el diámetro	62
fig. 50 Vertido en cubilote	64
fig. 51 Transporte del cubilote	64
fig. 52 Movimiento con grúa puente	64
fig. 53 Llenado del encofrado	64
fig. 54 Acumulación de fibras	64
fig. 55 Empujando la masa	64
fig. 56 Llenado de las cabezas	65
fig. 57 Finalizando el vertido	65
fig. 58 Probetas de control	65
fig. 59 Curado de las piezas	65
fig. 60 Elemento desencofrado	66
fig. 61 Placas de acero	67
fig. 62 Apoyos	67
fig. 63 Preparando el elemento	67
fig. 64 Placas atornilladas	67
fig. 65 Tornillo Ø10mm L100mm Broca Ø12mm	67
fig. 66 Posición de las bandas	68
fig. 67 Adhesivo	68
fig. 68 Dosificando el adhesivo	69
fig. 69 Vertido del catalizador	69
fig. 70 Se remueve la mezcla	69
fig. 71 Vertido del adhesivo	69
fig. 72 Aplicando presión	69
fig. 73 Banda pegada.	69
fig. 74 Posicionando el elemento	70
fig. 75 Transductores de desplazamiento	71
fig. 76 Transductor de carga	72
fig. 77 Conexión del transductor	72

**ARMADURA TRANSVERSAL EN PILARES DE HORMIGÓN CONVENCONAL CON FIBRAS DE ACERO
SOMETIDOS A FLEJO-COMPRESIÓN RECTA**

fig. 78 Mandos y control del grupo hidráulico	72
fig. 79 Cables con punteras.....	73
fig. 80 Conexión de las bandas	73
fig. 81 Cámara fotográfica	74
fig. 82 Montaje del soporte gráfico	74
fig. 83 Graficas de seguimiento	75
fig. 84 Toma de ceros y marcha	75
fig. 85 Fisuras en cara traccionada de ambos elementos ..	76
fig. 86 Final del ensayo.	77
fig. 87 Contenedores para residuos	78
fig. 88 Posición de las bandas extensiométricas.....	80
fig. 89 Instante de la rotura del elemento S01	82
fig. 90 Proceso de rotura del elemento S02	84

Anejo III

Índice de tablas.

Tabla 1 Características mecánicas (Canovas, 2011).....	19
Tabla 2 Hipótesis de excentricidad.....	35
Tabla 3 Hipótesis de armado longitudinal.	35
Tabla 4 Granulometría	45
Tabla 5 Dosificación del hormigón utilizado.	47
Tabla 6 Ensayo de escurrimiento.....	48
Tabla 7 Resistencia a compresión del hormigón.....	48
Tabla 8 Resistencia a tracción del hormigón.....	49
Tabla 9 Control de calidad del acero.....	50
Tabla 10 Diagrama de Gantt.....	97
Tabla 11 Tablas con el presupuesto del proyecto.....	100

Anejo IV

Índice de gráficas

Gráfica 1 Tensión de tracción-deformación respecto al volumen de fibras.....	22
Gráfica 2 Tensión de compresión-deformación respecto al volumen de fibras.....	22
Gráfica 3 Tensión flexión-deformación respecto al volumen de fibras.....	23
Gráfica 4 Diagrama de interacción-recta de carga.....	36
Gráfica 5 Granulometría.....	46
Gráfica 6 Ensayos a tracción del hormigón.....	49
Gráfica 7 Ensayo de tracción de los redondos de Ø16.....	51
Gráfica 8 Bandas en cara comprimida S01.....	81
Gráfica 9 Bandas en cara comprimida S02.....	83
Gráfica 10 Gráficas obtenidas del ensayo S01.....	87
Gráfica 11 Comprobación de sección del soporte S01.....	93
Gráfica 12 Comprobación de sección del soporte S02.....	94