UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL CONFINAMIENTO EN PILARES DE HORMIGÓN ARMADO

Hugo Mañero Sanz

Doctorado en Ingeniería Ambiental, Química y de los Materiales

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ingeniero Técnico de Obras Públicas
Ingeniero Técnico en Topografía

Madrid, 2019

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL CONFINAMIENTO EN PILARES DE HORMIGÓN ARMADO

Hugo Mañero Sanz

Doctorado en Ingeniería Ambiental, Química y de los Materiales

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ingeniero Técnico de Obras Públicas
Ingeniero Técnico en Topografía

Director:

Alfredo M. Luizaga Patiño
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Madrid, 2019

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL CONFINAMIENTO EN PILARES DE HORMIGÓN ARMADO

Autor:

Hugo Mañero Sanz

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ingeniero Técnico de Obras Públicas
Ingeniero Técnico en Topografía

Tribunal nombrado por el Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de para juzgar la tesis doctoral arriba citada, compuesto de la siguiente manera:

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Vocal Secretario:

Acuerda otorgarle la calificación de:

EL PRESIDENTE/A

EL SECRETARIO/A

LOS VOCALES

Madrid, de de

Agradecimientos

Realizar una tesis doctoral nunca ha sido tarea fácil, pero en mi caso mucho menos ya que las dificultades tanto personales como profesionales han estado muy patentes. Por todo ello, dedicar algunas palabras es lo menos que puedo hacer ante aquellas personas que han convivido en ésta ardua tarea.

Mi agradecimiento más sincero a mi Director de Tesis el Profesor D. Alfredo M. Luizaga Patiño Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, que ante todo es mi amigo, por su apoyo y saber trasmitirme amplios conocimientos en el ámbito de la ingeniería, además de sus sabios consejos y forma de ver la vida. A mi Tutora de la Tesis Dña. Victoria Alcázar Dra. Ciencias Químicas, quien me apoyó y aconsejó en todo momento. Tampoco me puedo olvidar de D. Vicente Lorenzo Dr. Ingeniero Industrial, quien fue mi primer tutor durante varios años en la E.T.S.I.I de U.P.M , y que espero que la jubilación le esté dando menos quebraderos de cabeza que los que yo le pude dar al comienzo de la presente tesis.

A los responsables del Plan de Doctorado de Ingeniería Ambiental, Química y de los Materiales de la E.T.S.I.I de la UPM, gracias a ellos pude matricularme en dicho plan de doctorado y poder llegar hasta aquí, jamás podré agradecerle semejante gesto.

Al Director de la Escuela Técnico Superior de Ingeniería Civil de la U.P.M. D. Jaime Marco García Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, quien me otorgó la oportunidad de dar continuidad a mi desarrollo doctoral empleando los Laboratorios de Materiales Construcción de la E.T.S.I. Civiles de la U.P.M. Al personal del Laboratorio de Materiales de Construcción de la E.T.S.I. Civiles D. Diego Pérez y D. Aurelio García, que en todo momento atendieron a las necesidades que surgieron durante el proceso.

A mis compañeros y colegas docentes Dña. Eva Mª García del Toro Dra. Ingeniería de Montes, D. Vicente Alcaraz Carrillo y Albornoz Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, y D. Juan Francisco Prieto Morín Dr. Ingeniero en Geodesia y Cartografía con quienes he podido compartir momentos muy intensos a lo largo de esto proceso.

De igual modo, a mis también compañeros y colegas D. José Ramón Sánchez Lavín Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, y D. Humberto Cerón Sánchez Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, que no han rehuído esfuerzos en animarme en esta dura tarea.

Mi agradecimiento a la Empresa Drizoro S.A.U. ya que facilitaron materiales para realizar diversos procesos en el ámbito de la E.T.S.I. Civil de la UPM.

A mis hermanos de la Maestranza de Caballería de Castilla, en especial a mi Decano D. Alfonso Ceballos Escalera y Gila Marqués de las Floresta y Vizconde de Ayala; D. Fernando Agudo y Sánchez Presidente de la Academia Internacional de Heráldica; y D. Javier García Bernal y Cuesta Cónsul Honorífico de Costa Rica.

Mención especial a mi profesor, amigo, colega y referente en mi vida D. Vicente Alcaraz Álvarez de Perea Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puerto, jamás olvidaré los consejos y el conocimiento que me transmitió durante años.

A mi familia, en especial a mi esposa Diana e mis hijos Alejandra y Mateo, por su apoyo y fuerzas que me dieron cuando en ocasiones me llegaron a faltar. No puedo olvidarme de mis padres, los cuales en vida pudieron ver el comienzo de éste proceso tan duro y complejo, pero no pudieron ver su final, aunque estoy convencido que desde donde estén seguro que estarán orgullosos del resultado.

Resumen

Los pilares son los elementos estructurales más sensibles de una estructura, por lo que definen la vida útil y la seguridad estructural. Por esta razón, es el elemento que se repara y refuerza con mayor frecuencia debido a diferentes causas tales como; cambios de uso, defectos constructivos e incluso defectos de proyecto.

A lo largo de la historia la reparación y refuerzo se realizaba empleando materiales y sistemas bastante complejos (presillas, recrecidos de hormigón etc.), alterando la sección transversal del pilar y repercutiendo en la distribución arquitectónica de espacios.

Los materiales de refuerzo han ido evolucionando hasta la utilización de FRP (Fiber Reinforced Polymer) en forma de tejidos que se adecuan perfectamente para la utilización de la técnica denominada confinamiento mediante la incorporación camisas alrededor del pilar. En esta tesis utilizamos los tejidos de fibra de carbono (CFRP) básicamente por su comportamiento elástico lineal hasta la rotura y su gran deformación unitaria lo que repercute en la ductilidad de la pieza, y por su módulo de elasticidad equiparable al del acero.

El estudio de confinamiento fue investigado por diversos autores llegando a la conclusión de que la capacidad portante de la pieza de hormigón mejora sustancialmente, lo mismo que la deformación axial, y que el comportamiento de la curva tensión-deformación (f_c , ϵ_c) sigue aproximadamente dos ramas. Sin embargo, se aprecia que en la primera rama existe una primera zona perfectamente elástica definida por el módulo de elasticidad inicial del hormigón (E_c). El objetivo de la presente tesis es ampliar dicho comportamiento elástico mejorando el módulo de elasticidad del hormigón, y para ello, se introduce una tensión inicial.

Se desarrolló una fase experimental que comprendió a la construcción de cuatro lotes de probetas de hormigón. El lote N°1 probetas de hormigón sin refuerzo, lote N°2 probetas de hormigón con una capa de refuerzo pasivo, lote N°3 probetas de hormigón con dos capas de refuerzo pasivo, y el lote N°4 probetas de hormigón con una capa de refuerzo activo.

Para llevar a cabo el objetivo anteriormente planteado se ideó un sistema innovador en el lote N°4, y poder introducir una tensión inicial (σ_i). Ese sistema innovador consistió en una estructura metálica de 1000 milímetros de alto incorporando un sistema de railes para poder realizar adecuadamente la envoltura tensional. Con éste método se introdujo una fuerza perimetral externa de 135 Newton a modo de confinamiento activo incorporando así mayor rigidez desde el primer instante en que el conjunto estuviese siendo sometido a compresión axial. Como el módulo de elasticidad representa el coeficiente angular (E_{ci}) de la recta, al incorporar la tensión inicial (σ_i) se mejora el coeficiente angular prolongando de esa manera deformación axial hasta aproximadamente $\varepsilon_c = 0,0007$.

El modelo tensión-deformación (f_c, ε_c) ampliamente aceptado es el de (L. Lam and J.G. Teng, 2009) en el que se distinguen dos ramas, pero en la presente tesis, a diferencia del planteado por (L. Lam and J.G. Teng, 2009), se plantea un nuevo modelo compuesto por tres ramas.

Abstract

The pillars are the most sensitive structural elements of a structure, so they define the useful life and structural safety. For this reason, it is the element that is repaired and reinforced more frequently due to different causes such as; changes in use, construction defects and even project defects.

Throughout history the repair and reinforcement was carried out using quite complex materials and systems (loops, concrete screeds, etc.), altering the cross section of the pillar and having an impact on the architectural distribution of spaces.

Reinforcement materials have evolved to the use of FRP (Fiber Reinforced Polymer) in the form of fabrics that are perfectly suited for the use of the technique called confinement by incorporating shirts around the pillar. In this thesis we use carbon fiber fabrics (CFRP) basically for its linear elastic behavior until the break and its great unit deformation which affects the ductility of the piece, and its modulus of elasticity comparable to that of steel.

The confinement study was investigated by several authors, concluding that the bearing capacity of the concrete piece improves substantially, as well as the axial deformation, and that the behavior of the tension-strain curve (f_c , ϵ_c) follows approximately two branches. However, it can be seen that in the first branch there is a first perfectly elastic zone defined by the initial modulus of elasticity of the concrete (E_c). The objective of this thesis is to extend said elastic behavior by improving the modulus of elasticity of the concrete, and for this, an initial tension is introduced.

An experimental phase was developed that included the construction of four batches of concrete specimens. The batch No. 1 concrete specimens without reinforcement, batch No. 2 concrete specimens with a passive reinforcement layer, batch No. 3 concrete specimens with two layers of passive reinforcement, and batch No. 4 specimens of concrete with an active reinforcement layer.

In order to carry out the aforementioned objective, an innovative system was devised in batch No. 4, and to introduce an initial tension (σ_i). This innovative system consisted of a metal structure of 1000 millimeters high incorporating a rail system to adequately perform the tensional wrapping. With this method, an external perimeter force of 135 Newton was introduced as an active confinement, thus incorporating greater rigidity from the first instant when the assembly was being subjected to axial compression. Since the modulus of elasticity represents the angular coefficient (E_{ci}) of the line, by incorporating the initial tension (σ_i) the angular coefficient is improved, thus prolonging axial deformation to approximately $\varepsilon_c = 0.0007$.

The widely accepted stress-strain model (f_c, ε_c) is that of (L. Lam and JG Teng, 2009) in which two branches are distinguished, but in the present thesis, unlike that proposed by (L. Lam and JG Teng, 2009), a new model is proposed, consisting of three branches.

Índice

Agradecimientos.....	I
Resumen	IV
Abstract	VII
Índice	X
Índice de figuras.....	XV
Índice de Tablas.....	XX
Notaciones.....	XXII

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción	1
1.2.- Objetivo de la investigación.....	5
1.3.- Organización del estudio.....	9
1.4.- Campos de aplicación.....	11

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1.- Antecedentes históricos	13
2.2.- Materiales. Propiedades y compuestos.....	18
2.2.1.- Hormigón.....	18
2.2.2.- Resinas. Formulaciones epoxídica.....	19
2.2.3.- Tipología de Fibras.....	23
2.2.4.- Fabricación de Fibras.....	32
2.2.4.1.- Pultrusión.....	33
2.2.4.2.- Técnicas de contacto manual.....	33
2.2.4.3.- Proceso de enrollamiento.....	34
2.3.- Ejecución del proceso.....	34
2.3.1.- Tratamientos del hormigón.....	34
2.3.2.- Fabricación. Modelo manual.....	37
2.3.3.- Durabilidad.....	38
2.4.- Comportamiento del hormigón. Estructuras.....	45
2.5.- Elementos sometidos a compresión. Deformaciones.....	49

2.6.- Sistemas de refuerzo. Empleo de polímeros en estructuras.....	51
2.7.- Estudio de estructuras.....	56
2.8.- Refuerzo de estructuras.....	59
2.8.1.- Recrecidos de hormigón.....	59
2.8.2.- Refuerzos encamisados y formas angulares.....	62
2.8.3.- Confinamiento de un pilar usando tejidos de fibra de carbono.....	66
2.9.- Análisis y comportamiento de modelos confinados con CFRP (cilíndrico)...	69
2.10.- Estudio de estructuras.....	70
2.10.1.- Modelo F. Richart et al.....	70
2.10.2.- Modelo Mander J. B. et al	71
2.10.3.- Diversos modelos teóricos	73

CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO Y METODOLOGÍA

3.1.- Alcance.....	77
3.2.- Generalidades sobre probetas de hormigón cilíndricas.....	78
3.3.- Ductilidad mecánica.....	83
3.4.- Consideraciones y dimensionamiento de pilares	84
3.5.- Descripción sobre el refuerzo en probetas de hormigón.....	85

CAPÍTULO 4. PROGRAMACIÓN EXPERIMENTAL

4.1.- Generalidades.....	88
4.2.- Modelos y análisis experimental.....	92
4.3.- Instrumentación y proceso de ensayo.....	98

CAPÍTULO 5. FABRICACIÓN Y REFUERZO

5.1.- Introducción.....	100
5.2.- Fabricación de probetas cilíndricas de hormigón.....	101
5.2.1.- Materiales.....	101
5.2.1.1.- Cementos.....	101
5.2.1.2.- Arena.....	101
5.2.1.3.- Grava.....	103
5.2.1.4.- Agua.....	104

5.2.1.5.- Aditivos.....	104
5.3.- Fabricación de probetas de hormigón.....	108
5.4.- Desmoldado de las probetas de hormigón.....	112
5.5.- Caracterización mecánica del hormigón.....	114
5.5.1.- Tensión característica del hormigón.....	114
5.5.2.- Módulo de elasticidad.....	115
5.6.- Material de Refuerzo.....	118
5.6.1.- Resina imprimación.....	118
5.6.2.- Resina Epoxídica.....	120
5.6.3.- Tejidos de Fibra de Carbono (CFRP)	125
5.6.4.- Material compuestos de Refuerzo. Fabricación de Talones.....	126
5.7.- Caracterización mecánica del material compuesto.....	131
5.8.- Proceso de refuerzo de las probetas de hormigón	133
5.8.1.- Probetas de hormigón con una capa de refuerzo pasivo.....	135
5.8.2.- Probetas de hormigón con dos capas de refuerzo pasivo.....	136
5.9.- Probetas de hormigón con una capa de refuerzo activo.....	137

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1.- Generalidades.....	144
6.2.- Probetas de hormigón sin refuerzo de CFRP.....	145
6.2.1.- Estudio teórico	145
6.2.2.- Instrumentación y ensayo.....	146
6.2.3.- Experimentación y análisis.....	146
6.3.- Probetas de hormigón con una capa de refuerzo de CFRP pasivo.....	149
6.3.1.- Estudio teórico	149
6.3.1.1.- Tensión de confinamiento.....	150
6.3.2.- Refuerzo pasivo con una capa de refuerzo CFPR.....	150
6.3.2.1.- Análisis teórico.....	150
6.3.3.- Instrumentación y ensayo.....	152
6.3.4.- Experimentación e interpretación.....	153
6.4.- Probetas de hormigón con dos capas de refuerzo CFRP pasivo.....	155
6.4.1.- Estudio teórico	155
6.4.1.1.- Tensión de confinamiento.....	155
6.4.2.- Refuerzo pasivo con dos capas de refuerzo CFPR.....	156

6.4.2.1.- Análisis teórico.....	156
6.4.3.- Instrumentación y ensayo.....	157
6.4.4.- Experimentación.....	158
6.5.- Probetas de hormigón con una capa refuerzo CFRP activo.....	160
6.5.1.- Estudio teórico	160
6.5.2.- Instrumentación y ensayo.....	161
6.5.3.- Discusión teórica.....	161
6.5.4.- Resumen y discusión con probetas con refuerzo pasivo y activo.....	164

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

7.1.- Introducción.....	169
7.2.- Conclusiones experimentales.....	169
7.3.- Conclusiones comparativas de modelos de cálculo propuestos en norma....	171
7.4.- Líneas futuras de investigación	173

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.

8.1.- Bibliografía.....	174
-------------------------	-----

Índice de Figuras

Figura 2.1	Ensayo de compresión. Simulación colapso rotura de pilar.....	14
Figura 2.2	Aspecto resina utilizada después de mezclar sus componentes.....	23
Figura 2.3	Micrografías muestra de fibras vidrio en matriz polimérica.....	24
Figura 2.4	Imagen de fibras de bambú.....	25
Figura 2.5	Distintos tipos de tejidos fibra carbono, aramida, y vidrio.....	26
Figura 2.6	Filamento comparado con pelo humano	27
Figura 2.7	Laminados y rollos de tejidos de fibra de carbono	31
Figura 2.8	Fabricación de FRP relacionado con la pultrusión.....	33
Figura 2.9	Representación de resistencia en función de radio	35
Figura 2.10	Dimensiones solapes 20 cm. Colocación tejidos de fibra de carbono...	36
Figura 2.11	Elementos fundamentales que puedes ser reforzados	41
Figura 2.12	Pilares reforzados con tejidos de fibra de carbono en una edificación..	42
Figura 2.13	Pilas de un puente confinadas empleando tejidos de fibra de carbono..	43
Figura 2.14	Refuerzo de tejido de carbono a cortante en viga.....	43
Figura 2.15	Refuerzo de tejido de carbono a cortante en pilar.....	44
Figura 2.16	Refuerzo tejidos de fibra de carbono de una chimenea.....	44
Figura 2.17	Refuerzo tejidos de fibra de carbono en un túnel.....	45
Figura 2.18	Diseño de un tronco en un entrono natural con aplicación de fuerzas...	46
Figura 2.19	Excentricidades definidas por la recta a-b.	47
Figura 2.20	Formas de secciones más usadas.	47
Figura 2.21	Representación secciones tipo soportes con estribos y zunchados.....	48
Figura 2.22	Representación longitud real de soportes de hormigón.....	51
Figura 2.23	Fisuras en un pilar de hormigón.....	52
Figura 2.24	Resultado Capacidad sobre protección en función del tiempo	54
Figura 2.25	Resultado de la reparación en función del tiempo.....	54
Figura 2.26	Resultado del refuerzo en función del tiempo	54
Figura 2.27	Tipología de esfuerzos I.....	57
Figura 2.28	Tipología de esfuerzos II.....	58
Figura 2.29	Refuerzo de un pilar saneado y reforzado con FRP.....	60
Figura 2.30	Refuerzo de pilar ejecutado proyectando hormigón	61
Figura 2.31	Refuerzo pilar con la técnica ángulos metálicos	63
Figura 2.32	Refuerzo de pilar con ángulos. Vista alzado con detalles.....	63
Figura 2.33	Encamisado metálico en sección elíptica.....	64
Figura 2.34	Ejecución confinamiento tejidos de fibra de carbono.....	65
Figura 2.35	Tensiones del refuerzo vinculantes en la sección y núcleo.....	67
Figura 2.36	Tensiones del refuerzo interactuando en la sección.....	68
Figura 2.37	Modelo Mander J. B et al.....	72

Figura 2.38	Comportamiento bilineal pilar reforzado tejido fibra carbono.....	74
Figura 3.1	Curva deformación y carga teniendo armaduras transversales.....	84
Figura 3.2	Pilares equivalentes con carga crítica.....	85
Figura 3.3	Comportamiento tensiones triaxiales.....	86
Figura 4.1	Relación tensión/deformación	93
Figura 4.2	Probeta de hormigón 300 x 150 mm. Plan de experimentación.....	93
Figura 4.3	Esquema de aplicación de carga axial.	94
Figura 4.4	Probetas de hormigón y preparadas para ensayo	95
Figura 4.5	Modelo estructural envoltura e imprimación FRP 1 capa ref. pasivo	97
Figura 4.6	Proceso de envoltura e imprimación probetas de hormigón.....	97
Figura 4.7	Aplicación confinamiento activo tensión de tres pesas de 135 Kn...	98
Figura 4.8	Bandas extensométricas.....	99
Figura 5.1	Proceso de secado.....	103
Figura 5.2	Balanza de pesado de materiales.....	109
Figura 5.3	Ensayo Cono de Abrams.....	110
Figura 5.4	Amasado de homogeneización.....	111
Figura 5.5	Moldes metálicos normalizados. Proceso de relleno. Trapo húmedo	112
Figura 5.6	Probetas reducidas curadas en cámara.....	113
Figura 5.7	Prensa empleada capacidad 150 Tn. Ensayo compresión.....	114
Figura 5.8	Preparación ensayo módulo de elasticidad.....	115
Figura 5.9	Preparación de ajuste y materiales ensayo módulo elasticidad.....	116
Figura 5.10	Componente resina epoxídica y preparación.....	121
Figura 5.11	Ejecución ensayos en flexo-tracción.....	123
Figura 5.12	Ejecución ensayos en flexo-tracción. Tensión obtenida.....	124
Figura 5.13	Ejecución compresión probeta resina epoxídica. Tensión-tiempo....	125
Figura 5.14	Diseño de probetas. Recomendación norma.....	127
Figura 5.15	Rollo de tejido de fibra de carbono. Preparación talones	128
Figura 5.16	Montaje y preparación. Uso celofán y finalización de probetas.....	130
Figura 5.17	Flexión producida. Probeta nivelación. Aspecto ensayo finalizado...	131
Figura 5.18	Uso de cepillo de púas duras para limpieza superficial.....	133
Figura 5.19	Preparación de mezclado con batidor de resina epoxídica.....	134
Figura 5.20	Montaje y preparación. Uso celofán, y finalización de probeta.....	135
Figura 5.21	Sistema de pegado sobre mesa y tablón de madera lote 2.....	136
Figura 5.22	Sistema de pegado sobre mesa y tablón de madera lote 3	137

Figura 5.23	Sistema de rodillo para realizar pegado.....	139
Figura 5.24	Sistema de pegado a tablón comienzo de proceso. Parte I.....	139
Figura 5.25	Sistema de pegado a tablón para comenzar proceso. Parte II.....	140
Figura 5.26	Balanza de pesaje.....	141
Figura 5.27	Aplicación rodillo en confinamiento activo con tres pesas.....	142
Figura 5.28	Restos de material en extremos eliminados.....	143
Figura 6.1	Representación ensayo de probetas sin refuerzo. Instrumentación.....	147
Figura 6.2	Ensayo ejecutado en prensa. Carga de rotura	148
Figura 6.3	Representación comportamiento tensional tejido-resina	149
Figura 6.4	Ensayo ejecutado en prensa. Carga de rotura	152
Figura 6.5	Representación ensayo de probetas una capa de CFRP pasivo.....	153
Figura 6.6	Comparativa valores medios tensión-deformación lotes N°1 y N°2...	155
Figura 6.7	Representación ensayo de probetas dos capas de CFRP pasivo.....	158
Figura 6.8	Diseño para incorporar tensión inicial en la capa de refuerzo.....	160
Figura 6.9	Ensayo módulo de elasticidad realizado.....	161
Figura 6.10	Proposed stress–strain model for FRP-confined concrete	162
Figura 6.11	Comparativa módulos de elasticidad lotes de probetas analizadas.....	164
Figura 6.12	Comparativa entre módulos de elasticidad.....	165
Figura 6.13	Comportamiento tensional	167

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Característica mecánicas tipologías de fibras	26
Tabla 2.2	Características generales de un laminado de fibra de carbono..	31
Tabla 2.3	Características generales de los tejidos de fibra de carbono.....	32
Tabla 4.1	Resumen plan experimental.....	92
Tabla 5.1	Granulometría de la arena utilizada.....	102
Tabla 5.2	Estudio granulométrico grava empleada (M.G. 12,5).....	104
Tabla 5.3	Tipo de aditivos de hormigón.....	106
Tabla 5.4	Datos de dosificación del hormigón.....	109
Tabla 5.5	Ensayos compresión probetas de hormigón.....	115
Tabla 5.6	Cálculos relacionados con el módulo de elasticidad.....	117
Tabla 5.7	Cálculos relacionados con el coeficiente de Poisson.....	117
Tabla 5.8	Propiedades mecánicas resina epoxídica.....	122
Tabla 5.9	Propiedades de los Tejidos de Fibra de Carbono.....	126
Tabla 5.10	Resultados ensayos a tracción laminado de refuerzo.....	132
Tabla 5.11	Ensayos a tracción. Valores experimentales.....	132
Tabla 5.12	Cálculos módulo de elasticidad una capa de refuerzo activo.....	143
Tabla 6.1	Representación de resultados experimentales de carga.....	159
Tabla 6.2	Representación de resultados experimentales de tensión.....	160

Notación

Mayúsculas romanas

A_g	área total de la sección del hormigón
A_e	área de la sección del hormigón confinada
D	diámetro de la sección
E_c	módulo deformación longitudinal del hormigón
E_{ci}	módulo de elasticidad media
E_{ck}	módulo de elasticidad característico
A_c	área transversal
A_s	área
E_f	módulo de elasticidad a tracción del FRP
E_{fib}	módulo de elasticidad en tracción de las fibras de carbono
E_m	módulo de elasticidad en tracción de la matriz
E_2	módulo de elasticidad tramo final modelo de tensión-deformación FRP
T_g	temperatura de tracción vítrea de los polímeros termoestables
ΔE_c	incremento de elasticidad inicial módulo de elasticidad
Δf_c	incremento deformación inicial módulo de elasticidad

Minúsculas romanas

f_{co}	tensión característica del hormigón
f_{cc}	tensión axial de rotura
f_c	tensión axial genérica (ecuación)
f_f	resistencia a tracción del FRP
f_{CF}	tensión de rotura del testigo de fibra de carbono
f_{CC}	tensión máxima axial final
f_{fib}	resistencia a tracción de los tejidos de fibra de carbono
f_L	tensión de confinamiento genérico
f_{Li}	tensión de confinamiento inicial
f_m	resistencia a tracción de las fibras
$f_{c\,elast}$	tensión <i>axial elástica</i>
f_{ck}	<i>tensión</i> axial característica
f_s	<i>tensión</i> axial
f_x	tensión horizontal de confinamiento
f_{Lu}	tensión de confinamiento último
k_ε	factor de eficiencia deformación del FRP teniendo en cuenta la relación entre la deformación de rotura del FRP en la camisa y ensayos de material
k_l	factor incremento de resistencia en función de la presión lateral
k_2	factor incremento deformación última función de presión lateral

t	espesor de FRP
E_c	módulo de elasticidad inicial del hormigón
E_{CFRP}	módulo de elasticidad del testigo de fibra de carbono
n	número capas de refuerzo
r	radio del pilar

Minúsculas griegas

γ_f	coeficiente parcial material FRP
ε_c	deformación axial unitaria
ε_{cc}	deformación axial final
ε_{co}	deformación axial del hormigón sin confinamiento en el momento que alcanza resistencia a compresión f_{co}
ε_{CFRUP}	deformación unitaria de rotura de FC máxima
ε	deformación
$\varepsilon_{u\ axial}$	deformación unitaria axial de rotura
ε_j	deformación en FRP
ε_f	deformación última FRP (ensayos a tracción)
ε_{fu}	deformación última efectiva FRP
ε_l	deformación lateral en hormigón
ε_t	deformación axial correspondiente al punto de curva tensión deformación en el hormigón confinado FRP
t_{CF}	espesor del testigo de fibra de carbono (mm)
ϕ	diámetro de la sección transversal del pilar (probeta normalizada)
η_a	coeficiente reductor propiedades FRP según modo de aplicación y exposición (guía CNR)
ρ_f	cuantía geométrica refuerzo FRP
ρ_k	rigidez del confinamiento
ρ_ε	relación de deformación
σ_i	tensión inicial circunferencial
σ_j	tensión camisa FRP
σ_l	presión de confinamiento
Ψ_f	coeficiente reductor resistencia FRP considerando ACI440.2R-08
μ	ductilidad

CAPÍTULO 1

Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

Durante los últimos siglos los materiales empleados en la construcción han evolucionado de manera exponencial agilizando el uso de los mismos en todas y cada una sus fases. Un caso muy evidente es el uso del hormigón que ha experimentado una evolutiva muy satisfactoria para las estructuras, y donde aún existe un amplio campo de experimentación.

Esta eficiencia evolutiva de los materiales a lo largo del tiempo contribuyó al desarrollo de las ciudades, y en definitiva, el desarrollo urbanístico de las grandes urbes. Es por ello, que a medida que las estructuras de hormigón han ido desarrollándose también lo han hecho las grandes ciudades a través de sus grandes edificios e infraestructuras de todo tipo tales como; hidráulicas, ferroviarias, portuarias etc. Además, en las grandes urbes se crearon zonas habilitadas para el deshecho de los materiales sobrantes de las obras constructivas y/o renovadas. Esos lugares que se creaban tanto en las afueras de las grandes ciudades como de pequeños municipios se realizaban de manera poco precisa provocando caos y desorden político. A la vista de los problemas se buscaron soluciones legislativas. Esas decisiones y leyes

Entre los años 2004 y 2012, nuestro país ha sufrido un incremento en la construcción muy importante. Esa alta actividad generó una gran cantidad de residuos y materiales desechables procedentes de esta actividad. Se realizaron numerosos desarrollos nuevos, y también demoliciones de otras zonas más deterioradas con el paso del tiempo. En la nomenclatura de residuos de la construcción hay cierta variedad, pero los principales son el material cerámico y el hormigón. Como indicamos anteriormente, el impacto ambiental puede ocasionar problemas difíciles de solucionar como contaminación de acuíferos internos, y provocar un paisaje poco adecuado (M. Breveglieri et. al. , 2012).

Todo esto conlleva la imperiosa necesidad y cada vez más frecuente del uso de reparar y reforzar las estructuras de hormigón (Pierre Rochette and Pierre Labossière, 2000). En España, el sector de la construcción evolucionó de manera muy rápida pero no debemos de olvidar que nuestro país al igual que muchos otros cuenta con una gran cantidad de estructuras envejecidas, y que requieren unas labores de conservación y mantenimiento importante. Éste es el motivo por el cual cada vez más el refuerzo de estructuras está cobrando gran valor añadido, ya que aúna factores muy rentables en relación a la economía, capacidad sostenible, impactos ambientales y lo más importante, con estos refuerzos se puede aumentar la durabilidad y ductilidad de las estructuras de hormigón armado (Alcaraz Álvarez de Perea, V. , 2013).

Esta tesis trata sobre el refuerzo de probetas normalizadas de hormigón en sección circular (en adelante, probetas de hormigón). El refuerzo se puede emplear con varios propósitos siendo uno de ellos el deterioro del supuesto pilar y/o columna ante deformaciones en compresión (X.S.X.G.Y.L.T. Chen , 2013) y (Alireza Saljoughian and Davood Mostofinejad. , 2016). Los refuerzos también son usados en vigas y/o puentes.

El empleo de los mismos ha provocado un uso más eficiente para las estructuras pero también nos ha permitido optimizar la técnica del uso del refuerzo (A.A.C.I. Standard, 1981). Desde hace años se han usado métodos para reforzar una estructura, gracias a ese uso hemos llegado al desarrollo y empleo de materiales compuestos que por otro lado están resultado ser muy eficaces y eficientes. En esta tesis se usará una tecnología de vanguardia donde se emplearán materiales compuestos para el refuerzo de elementos estructurales. Para este caso, se aplicaran los polímeros reforzados con fibra o como son más conocidos Fiber Reinforced Polymer (FRP) (Wu H. and Xiao Y, 2003).

El uso de esta técnica vinculada a la teoría del confinamiento que se lleva usando desde 1940 aproximadamente.

Existen estudios que albergan que el desarrollo de esta técnica fue más lenta por sus costes económicos pero también existen otros estudios que indican lo contrario. Actualmente, no es una técnica tan cara para el rendimiento que puede llegar a dar ya que dispone de grandes ventajas, entre ellas prolongar la fase elástica de la propia estructura, pero también de inconvenientes como la compleja colocación de puesta en obra y su poca resistencia ante escenarios de fuego.

El empleo del refuerzo usando la técnica del confinamiento en elementos estructurales provoca un aumento en la resistencia de la estructura de hormigón en compresión. Una de las aplicaciones más comunes de este fenómeno es el refuerzo a través del confinamiento en pilares de hormigón armado para estructuras en edificios, puentes y/o vigas (M.W.L. H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, 2001), (M.W.L.H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, 1994) y (Miriam Amir and Shahawy Mohsen , 1997).

Es importante saber que este proceso de refuerzo, en definitiva, lo que produce es un aumento de la tensión axial a compresión en los elementos estructurales. Estos procesos han sido estudiados desde el siglo pasado de diversas maneras hasta nuestros días (AIRE, C. M., 2002).

El objetivo del presente estudio es usar materiales compuestos para provocar el confinamiento, donde el refuerzo limitará la libre expansión transversal del elemento estructural.

Después de muchos estudios en relación a la FRP aún continua la investigación en este campo (L. Bisby and M. Ranger , 2010), (C. Puhersch, 2005), (T. Ozbakkaloglu and J.C. Lim , 2008) y (L. Lam and J.G. Teng, 2004). El proceso consiste cuando en el momento que el hormigón es sometido a una carga axial, se produce el efecto barril más conocido como Poisson, obligando y sometiendo al refuerzo de FRP a producir unas tensiones de tracción transversal en el elemento confinante hasta que finalmente se produce la rotura de éste.

La mayoría de los estudios experimentales son generados de manera empírica, y en modelos reducidos (Homayoun KhaliliMichael N. Fardis , 1982) y (Guoqiang Li , 2006). En nuestro caso, se emplearon probetas de hormigón normalizadas con forma cilíndrica de pequeño tamaño

150x300 milímetros simulando un pilar de hormigón (en adelante se hablará de probetas de hormigón). Dichas probetas de hormigón han sido fabricadas por hormigones de características medias entre 30 a 50 N/mm². Estos son los modelos experimentales más usados y frecuentes, y de los que más documentación se puede encontrar.

La clave de todos estos procesos es prolongar la deformación unitaria axial, y de esta manera dotar de una mayor ductilidad al elemento estructural.

Existen múltiples estudios relacionados con esta tipología de procesos ratificando que la forma más efectiva ha sido la cilíndrica. Es verdad que existen investigaciones sobre otras formas como prismáticas, pero la cantidad de estudios son menores. Esto no deja de ser una contrariedad en tanto en cuanto muchísimas de las estructuras en el mercado son diferentes a cilíndricas. Las investigaciones aluden a un confinamiento empleando FRP menos eficiente en secciones prismáticas y/o cuadradas (WU, Y. F. and ZHOU, Y. W. , 2010), pero estudios realizados recientemente han manifestado que su aumento en relación a la compresión es significativo.

Todos estos procesos son empíricos, y con un alto grado de experimentación. En todo proceso experimental donde se pretende hacer uso del refuerzo mediante confinamiento activo FRP existen situaciones preliminares y/o incertidumbres. En el caso que nos atañe empleamos probetas de hormigón, esas situaciones podrían describirse en varios puntos generales, siendo estos:

- El proceso se ejecutó sobre probetas de hormigón de dimensiones pequeñas y forma cilíndrica de 150x300 milímetros. Existen multitud de investigaciones sobre esta forma de probetas de hormigón, y además, es de uso común en los Laboratorios de Materiales de Construcción. Es complicado poder probar este tipo de elementos en estructurales a escala real y someterlos a ensayo. Esta situación corrobora que el estudio experimental se adecúa perfectamente a probetas de hormigón, pero exige en el futuro ensayos con elementos de mayor tamaño.
- Los materiales empleados en los ensayos para la fabricación de los hormigones son los que normalmente se usan en la mayoría de las obras, tal y como se comentó anteriormente oscilan con una resistencia media entre los 30 y 50 N/mm². Hay que tener

en cuenta que el uso del confinamiento puede ser empleado en estructuras de edificios construidos hace décadas, por lo que las características de los materiales es muy probable que sean de menor resistencia.

- Uno de los objetivos del proceso es realizar un estudio normalizado de forma experimental sobre la deformación empleando el material de FRP en las probetas de hormigón. Al emplear un modelo reducido existen dispersiones en relación a la deformación final, tales como las propias tensiones del FPR, y muy especialmente defectos de ejecución. Se deben de mejorar los modelos de cálculo bien con técnicas de elementos finitos y/o otros modelos de cálculo.

1.2. Objetivo de la investigación

Uno de los objetivos es comprender mejor el comportamiento mecánico de un pilar utilizando de manera experimental probetas de hormigón reducidas siendo reforzándolas empleando la técnica de confinamiento mediante el uso de tejidos de fibra carbono (CFRP) (M.W.L. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, 1994), (Homayoun KhaliliMichael N. Fardis , 1982) y (G. Wu et. al. , 2006). Todo ello conlleva que el sistema tenga como misión generar in situ un sistema laminar que sea perfecto adaptándolo a las propias características geométricas, y a las necesidades mecánicas que pudiera tener el elemento estructural en cuestión.

Para dicho objetivo se construyeron cuatro lotes de probetas de hormigón siendo; el 1º lote con 5 probetas de hormigón sin refuerzo, el 2º lote con 5 probetas de hormigón con una capa refuerzo pasivo, el 3º lote con 5 probetas de hormigón con dos capas refuerzo pasivo, y el 4º lote con 5 probetas de hormigón con una capa de refuerzo activo. Asumimos, que el hormigón fragmenta a deformación dos por mil, y también que la tensión del refuerzo es exclusivamente a tracción. Los ensayos se ejecutaron en el Laboratorio Materiales de Construcción de E.T.S.I.C de U.P.M. (T. Ozbakkaloglu and J.C. Lim , 2008), (Marijn R. Spoelstra , 1999), (T. Jiang and J.G. Teng, 2012), (Y. Wu and L. Wang, 2009) y (T. Jiang, J.G. Teng., 2007).

Otro de los objetivos está directamente vinculado con el lote 4, donde se aplicará el refuerzo a modo de confinamiento activo. En consecuencia, se diseñó un método con un diseño absolutamente innovador. Dicho diseño consistió en una estructura metálica de forma vertical con la colocación de dos rieles adheridos longitudinalmente a la estructura metálica

previamente diseñada. Con éste método único se introdujo una fuerza externa de 135 Newton a modo de confinamiento activo e incorporando así mayor rigidez desde el primer instante en que el conjunto estuviese siendo sometido a compresión axial. Lo realmente importante, y en consecuencia novedoso, es que con la aplicación de la técnica de confinamiento activo se consigue realizar una modificación sustancialmente mejorada en el cálculo del módulo de elasticidad del hormigón.

Normalmente, cuando proyectamos una estructura de hormigón debemos de tener presente una serie de materiales necesarios para la misma, ya que es de vital importancia que sean capaces de soportar acciones de distintas características y magnitudes. Es necesario que esos elementos estructurales estén preparados ante situaciones accidentales, y deben de estar ejecutados para alcanzar el final de su vida útil en perfectas condiciones de uso para no tener que realizar posteriormente grandes desembolsos (H. Baji et. al. , 2016). Cabe la posibilidad de que durante la vida útil de la estructura existan problemas de ejecución, cambios inesperados de diseño, en definitiva, existen situaciones que pueden llevar afectar negativamente la estructura hasta el punto del colapso.

Es por ello, existen factores de verdadero impacto negativo en la capacidad resistente de la estructura. Dichos aspectos podrían englobarse en:

- Un uso diferente al establecido. Normalmente, siempre para soportar más carga de la establecida en proyecto y/o unas distribuciones absolutamente desproporcionadas. Es evidente que en estos casos la estructura corre el riesgo de no poder soportar el factor de seguridad para el que fue diseñado. En estas ocasiones, y con la antelación adecuada, se puede plantear reforzar y reparar el elemento estructural de la posibilidad de colapso.
- Causas accidentales que disminuyen las capacidades resistentes de la estructura en su conjunto o en algunos elementos de la misma. Es complejo, pero en estos eventos debemos dotar nuevamente a la estructura de la resistencia inicial adecuada.
- Posibles errores de proyecto que pueden comprometer la capacidad resistente, y en consecuencia la estabilidad de la estructura.

- De igual modo, posibles errores de ejecución que en el ámbito de la construcción suelen ser frecuentes en relación al armado y/o empalmes de las armaduras, incluso simplemente la mala calidad de los materiales.

Siempre que se busque usar un procedimiento de refuerzo es de vital importancia tener identificadas las causas que inicialmente propiciaron esos fallos estructurales. Por todo ello, este trabajo pretende desarrollar una técnica de refuerzo en probetas de hormigón que nos permita aumentar la vida útil de una estructura.

Desde que se empezó a desarrollar las técnicas de refuerzo en estructuras los sistemas han ido evolucionando, nos podemos encontrar desde el incremento de las secciones transversales recreciendo el hormigón, encamisados metálicos, presillas de acero para pilares, o el empleo como es nuestro caso actual usando fibra de carbono mediante materiales compuestos.

Tal y como se comentó anteriormente, éste documento tiene como fin estudiar, experimentar y analizar probetas de hormigón aplicando la técnica de confinamiento tanto de forma pasiva como activa. Por un lado, se han empleado una y dos capas de tejidos de fibra de carbono respectivamente en diferentes lotes a confinamiento pasivo, y se han analizado comparando sus comportamientos mecánicos a través de los ensayos ejecutados. Por otro lado, se ejecutó un estudio comparativo y evolutivo entre los lotes que fueron ejecutados con una capa de tejido de fibra de carbono a confinamiento pasivo con el lote que se ejecutó con una capa de tejido de fibra de carbono a confinamiento activo. En este caso, se observó claramente debido al diseño innovador fabricado para tal fin una importante mejoría en relación al módulo de elasticidad del hormigón.

En consecuencia, un factor realmente vital fue mejorar el módulo de elasticidad en las probetas de hormigón en la zona en la que, con certeza, se sabe que el hormigón es elástico. El método innovador permitió la introducción de una tensión inicial (σ_i) que se traduce en un incremento de la tensión axial de trabajo.

Es una tecnología que avanza rápidamente ya que se ha demostrado que la fabricación de tejidos de fibra de carbono permite disponer de mejores comportamientos mecánicos, mayores tensiones elásticas y módulos de elasticidad.

El encolado y la impregnación entre el tejido de fibra de carbono y las probetas de hormigón se realizan mediante la utilización de resinas epoxídicas. Esta técnica es una solución realmente atractiva ya que permite usarla sin modificar la sección del elemento estructural. Además, su ligereza y versatilidad permite ser adaptable en los elementos estructurales con lo que facilita la comodidad de puesta en obra.

Dicho conjunto desde el punto de vista mecánico y resistencia de materiales, dispone de un magnífico comportamiento a la fatiga. Hay que destacar que los materiales involucrados en el proceso como el hormigón, resina epoxídica y el tejido de fibra de carbono actúan de manera simultánea con el único objetivo de resistir aquellos esfuerzos supeditados por la acción de cargas sobre las probetas de hormigón y/o estructura en cuestión. Por todo ello, es de vital importancia tener claras las conclusiones para poder emprender un proyecto de reparación empleando este método, ya que obtener la confianza y garantía suficiente es fundamental, por ese motivo realizar ensayos de laboratorio es clave para disponer de unos buenos datos adecuados de experimentación.

Existen varios motivos por los cuales se emplean los tejidos de fibra de carbono pero el más fundamental es que permite que la sección transversal de las probetas de hormigón permanezca con características de origen prácticamente intactas.

El tejido de refuerzo está compuesto por unas fibras de carbono colocadas de manera unidireccional y paralelas entre sí, y unidas transversalmente por medio de hilos de fibra de vidrio. Los tejidos de fibra de carbono empleados en esta tesis vienen en rollos de 50 metros de longitud y un ancho de 30 centímetros. Existen otros casos y/o circunstancias donde se debe de emplear una alta resistencia (HM), en estos casos los rollos son de 50 y 100 metros de longitud y anchos de 25, 33 y 50 centímetros.

Un factor importante es el espesor de los tejidos valor a tener muy en cuenta a la hora de ejecutar los cálculos. En este caso, los espesores de los tejidos de fibra de carbono oscilan entre 0,111 y 0,167 milímetros, pero para el caso de alta resistencia (HM) serían de 0,163. Disponen de unas características técnicas a tracción de 3.400 N/mm^2 que fueron usadas para la presente tesis, y 2.400 N/mm^2 en el caso de necesitar una alta resistencia (HM). Sin embargo, los módulos de elasticidad de 230.000 N/mm^2 fueron usados en la presente tesis, y 440.000 N/mm^2 en aquellos

casos que se precise una alta resistencia (HM). Se dispondrá para el presente estudio de un alargamiento de rotura del 15% y densidad de 1.10 kg/dm^3 .

El uso del refuerzo el tejido de fibra de carbono se aplica extendiéndolo y apretándolo de manera manual por medio de un elemento auxiliar paleta y/o rodillo sobre una capa especialmente preparada en ese momento de resina epoxídica de características especiales. La relación de mezcla se realiza de manera proporcional siendo cuatro partes del agente principal por una parte de endurecedor. Aplicándose debidamente sobre las probetas de hormigón anteriormente mencionadas, y que han debido estar limpias y preparadas adecuadamente, posteriormente, como último paso, se le aplica otra capa de resina epoxídica de terminación de proceso.

El diseño planteado en el presente documento no está condicionado por las características del tejido de fibra de carbono, y que han sido mencionadas, sino la consideración del conjunto compuesto de resinas-tejido. Previamente, se realizaron estudios del compuesto para obtener los valores relacionados con la resistencia a tracción y módulo de elasticidad.

1.3. Organización del estudio

La organización del estudio de la presente investigación tiene como objetivo fundamental establecer una metodología que nos permita alcanzar los objetivos marcados inicialmente. Esta tesis dispone de un grado de experimentación elevado por lo que sería conveniente realizar un estudio muy concreto de los materiales involucrados en todo este proceso de refuerzo de probetas de hormigón para poder soportar los esfuerzos de compresión, y ocasionalmente, los de flexión que pueden ser de forma directa o incluso el propio pandeo.

Debido a estas circunstancias iniciales se realizó un proceso inicial de caracterización de los materiales intervinientes. El proceso consistió en la caracterización siguiente:

- Caracterización mecánica del hormigón.
- Caracterización mecánica del adhesivo (resina epoxídica) a utilizar.
- Caracterización mecánica de los tejidos de fibra de carbono impregnados con resina epoxídica, más conocido como compuesto.

Para poder realizar este estudio se prepararon 20 probetas de hormigón de 300x150 milímetros, y que fueron ensañadas posteriormente. Dichas probetas se fabricaron en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnico Superior de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid. Lógicamente, estos primeros resultados sirvieron para la toma de decisiones de la forma del refuerzo, y las capas a emplear.

Para el proceso de refuerzo se empleó un adhesivo que fue proporcionado por la empresa (Drizoro S.A.U., 2013), y que previamente fue caracterizado siendo considerado apto para este proceso. Se tuvo en cuenta que el refuerzo estuviese formado conjuntamente por el tejido de fibra de carbono siendo impregnado con resina epoxídica.

Las características mecánicas descritas en nuestro análisis de resultados no serán afectadas por ningún factor, salvo los que vengan derivados de la caracterización de los propios materiales que representen aspectos propios de cada material utilizado.

Uno de los datos más importantes fue saber la carga última de rotura que una probeta de hormigón es capaz de soportar, aunque sea de forma teórica, ya que a partir de ese punto se podría plantear diferentes escenarios de conocimiento de distintos estados por los que transitará el elemento estructural. En la práctica, conocer este dato es de vital importancia ya que con el se puede establecer los estados límites de servicio del mismo, y en su defecto, poder disponer de un factor de seguridad adecuado.

El estudio inicial teórico que realizamos a los elementos reforzados, y que fueron sometidos a una carga axil nos ayudó a poder obtener un amplio conocimiento sobre el funcionamiento elástico, al igual que su estado de rotura. Cabe la posibilidad de que exista un fallo en el refuerzo debido a un posible agotamiento de algún material del compuesto y/o porque dispongan de una reformación elevada o excesiva.

La planificación de estos ensayos supuso conjuntamente una caracterización de materiales compuestos para nuestro refuerzo. Tal y como se describió en el punto 1.2 del presente capítulo, los ensayos se ejecutaron sin refuerzo, con una capa de tejido de fibra de carbono con resina epoxídica (confinamiento pasivo), con dos capas de tejido de fibra de carbono con resina epoxídica (confinamiento pasivo), y por último aplicando un método innovador para una capa

de tejido de fibra de carbono con resina epoxídica (confinamiento activo), siempre empleando y respetando un único formato con las probetas de hormigón.

Los ensayos realizados responden a ensayos mecánicos que normalmente se han utilizado en cualquiera de los estudios habituales en estructuras convencionales vinculadas a probetas de hormigón. Para poder asegurar, y en buena lógica completar el estudio experimental, se ejecutó un análisis en profundidad con el fin de encontrar todas las explicaciones sobre el comportamiento mecánico, y aquellos procesos que pudieran llegar a provocar un colapso estructural sobre las probetas de hormigón.

La información que se obtenga en este proceso sobre el conjunto de variables y ensayos nos ayudaran a entender y conocer mejor los límites de estado de servicio, y la mejor opción en la selección de materiales para el refuerzo obteniendo, así como una mayor idoneidad y eficacia.

En los capítulos 3 y 4 de la presente tesis se podrá observar el planteamiento y metodología llevada a cabo al igual que la programación experimental realizada. Por otro lado, en los capítulos 5 y 6 se alcanzará el proceso de composición y refuerzo, y el propio análisis de resultados obtenido.

1.4. Campos de aplicación

El refuerzo con fibra de carbono está presente en multitud de ámbitos de la ingeniería civil y/o construcción. A continuación, se presentan los campos de aplicación más notables, enumerando las causas por las que se realiza el refuerzo.

- Incremento de cargas:
 - Aumento de la carga viva en depósitos.
 - Incremento del desarrollo de tránsito en puentes.
 - Instalación de maquinaria pesada en industrias.
 - Estructuras sometidas a vibración.
 - Cambio de uso de la estructura.

- Daños que aparecen en los elementos estructurales:

- Envejecimiento de los materiales de construcción.
- Corrosión del acero de refuerzo.
- Impactos accidentales o siniestros.

- Mejora de la capacidad portante:
 - Disminución de las deformaciones.
 - Reducción del esfuerzo del acero.
 - Reducción del tamaño de las fisuras.

- Modificación del sistema estructural:
 - Eliminación de pilares.
 - Eliminación de secciones de losas (escaleras o ascensores).

- Errores de diseño o construcción:
 - Insuficiente cuantía de acero.
 - Dimensiones insuficientes de los elementos estructurales.

El refuerzo con tejidos de fibra de carbono puede utilizarse para aumentar la capacidad resistente de un hormigón en determinadas situaciones de solicitaciones mecánicas. En ese caso, se presenta como una solución para cualquier problema vinculado con la durabilidad de la estructura como puede ser la minimización en relación a la corrosión de las armaduras o el sellado de vías de agua. También se emplea para reforzar la flexión de vigas, losas, muros y otros elementos.

La capacidad a flexión de elementos reforzados, pretensados y/o postensados puede aumentar hasta en un 70%. Una de sus posibles aplicaciones es la colocación sobre muros de hormigón y mampostería, para aumentar su resistencia a otros efectos, tales como aquellas debidas al viento, presión del suelo, presión de fluidos en tanques, y volados.

CAPÍTULO 2

Estado del Conocimiento

2.1 Antecedentes históricos

El hormigón es un material compuesto por cuatro elementos fundamentales y mezclados en la dosificación adecuada. Dichos materiales son el agua, arena, grava, y cemento. Si al hormigón le añadimos el acero entonces obtendremos el hormigón armado, que es la resultante de dos compuestos fundamentales siendo estos; hormigón y acero. El hormigón aporta una buena resistencia a la compresión, un conveniente módulo de elasticidad, una buena estabilidad ante situaciones inesperadas de inestabilidad, y desde luego una buena caracterización para poder ser moldeable. Obviamente, dispone de una deficiente resistencia ante la tracción. No obstante, esa deficiencia es corregida por otros elementos. Por otra parte, el acero formado por barras colocadas longitudinalmente embebidas en el hormigón, siendo su colocación la idónea corrige el problema de la resistencia a tracción.

El conjunto de los materiales que dan como resultado el hormigón armado se puede producir por la capacidad que dispone ambos materiales desde el punto de vista de la adhesión. Es decir, por un lado disponemos de un carácter físico dando como resultado la retracción del

hormigón que envuelve al propio acero, y otro lado muy importante también el aspecto químico que se produce mediante las reacciones iónicas que se producen entre el propio cemento y acero, y también a la unión aportada por parte las corrugas transversales del propio acero de las barras de acero longitudinales.

Por ello, la adherencia debe ser muy fuerte para que las barras que están siendo sometidas a esos esfuerzos de arrancamiento axial no se muevan pudiendo llegar a su estado último, provocando así la rotura por el temido cortante del hormigón.

Bien es sabido que los elementos estructurales más sensibles son los pilares dentro del ámbito de la edificación y/o ingeniería civil, donde se emplean normalmente tanto cargas axiales siendo estas combinadas con momentos flectores. Generalmente, un colapso estructural conlleva la destrucción absoluta de la estructura con las consecuencias que eso pueda tener.

Figura nº2-1. Ensayo de compresión. Simulación colapso rotura de pilar.

En la figura nº2-1 se muestra el efecto de un colapso de un pilar fragmentado de hormigón. Lógicamente, se deben distinguir dos tipologías de materiales esenciales dentro de una estructura tipo soporte vertical. Esta formada por el propio hormigón de manera mayoritaria, con una armadura longitudinal que a su vez junto con el propio hormigón son capaces de absorber tensiones de compresión y en algunas ocasiones algunos esfuerzos a flexión, y también existe una armadura transversal con diámetros menores cuyo objetivo no es otro que evitar el pandeo lateral de la propia armadura longitudinal teniendo su origen en el empuje que realiza el núcleo de hormigón al exterior (Priestley, N., et al. , 1994). Con esta descripción se pretende explicar la primera tipología de confinamiento que experimenta el elemento estructural (pilar).

En el caso de que se apliquen cargas axiales la propia deformación unitaria provocada por la compresión será igual en toda la sección que tengamos de manera transversal. Por ello, toda la adherencia existente entre el hormigón y el acero será una deformación unitaria exactamente igual en ambos materiales de los que estamos realizando las observaciones.

Se plantea que en el caso de disponer tensiones con $f_{ck}/2$ el material de hormigón tendrá un comportamiento que cumplirá (aproximadamente) la Ley de Hook con deformaciones y tensiones de manera proporcional, teniendo una deformación máxima de $\epsilon_h=0,0005$. Es sabido que el acero dispone de unas características elásticas hasta llegar al llamado punto de fluencia, y este punto está aproximadamente en el $\epsilon_s=0,0015$. Por estudios realizados es sabido también que en la primera fase donde se carga el hormigón asume aproximadamente el 85% del esfuerzo mientras que el propio acero solo un 15% de la acción axial totalitaria.

Sin embargo, en la fase donde se encuentra el hormigón de manera anelástica, quiere decir que nos encontraremos en una deformación longitudinal superior a $\epsilon_h=0,0005$, en este caso, las tensiones bajarán porque ya no serán proporcionales. En ese caso, el acero seguirá trabajando de manera elástica. En consecuencia, esta bajada de la tensión será asumida por el propio acero llegando a soportar hasta un 30% de la acción (carga axial). Como es lógico, la carga de rotura para un pilar es el dato y/o magnitud más importante a tener en cuenta. Toda información vinculada a las deformaciones, tensiones y cualquier otra magnitud o dato servirán de un gran valor para poder determinar cualquier la capacidad de carga.

En el momento que se toma la decisión de emplear un refuerzo externo por pegado de un material cualquiera resistente empleando el uso de un adhesivo a la propia superficie del hormigón, en este caso, el dispositivo de adhesión es diferente del anterior debido a la ausencia del efecto de retracción y engranaje en las corrugas de las propias barras longitudinales.

El proceso de refuerzo de elementos estructurales que desarrollaremos en el presente documento refleja un fenómeno sobre la adherencia al hormigón por medio de adhesivo. Este adhesivo que se utilizará dispone de una formulación epoxídica (Miravete, A. , 2000).

Desde mediados del siglo pasado los estudios relacionados con esta materia estaban enfocados hacia la unión de elementos por la técnica de encolado. Como hemos indicado

anteriormente la aparición de los polímeros que son capaces de polimerizar en temperatura ambiente sin problema alguno, y que además disponen de propiedades resistivas y adhesivas, las líneas de investigación van enfocadas al refuerzo de estructuras ante esfuerzos de tracción que servirán para reforzar dichas estructuras.

Siempre existe un comienzo, y en este caso los primeros investigadores comenzaron su andadura en el refuerzo mediante bandas de acero encoladas. Las primeras publicaciones datan del año 1967 y 1968. En estos años (L'Hermite. Annales ITBTP n° 529, 1994) y (Bresson and Beton Plaqué, 1972), describieron presentando en RILEM la mejor manera de trabajar de los refuerzo.

En nuestro país siempre ha habido un buen nivel de conocimiento estructural. En el año 1969 se empezó a realizar la aplicación de esta técnica empleando las bandas encoladas de acero con resinas epoxídicas. El maestro y pionero en España de esta técnica fue (Fernández Cánovas, 1985), es el primero en potenciar e investigar el refuerzo. La primera vez que se aplicó fue en un edificio en la emblemática Calle de Arturo Soria en Madrid, era un edificio donde existía una problemática añadida en flexión de vigas.

Posteriormente, en Francia país que como España realizaron investigaciones muy importantes, como la producida en Toulouse (Francia) donde se presentaron avances de vital importancia en estructuras con tipologías relevantes como puentes y túneles, y donde se hizo especial referencia a (Fernández Cánovas, 1985).

Todos estos resultados abrieron la posibilidad de poder realizar amplias investigaciones para poder verificar todos los procesos tal y como desarrollaron (L'Hermite. Annales ITBTP n° 529, 1994) y (Bresson and Beton Plaqué, 1972). Es un punto de inflexión ya que desde esa época se fueron investigando todo lo relacionado con esta técnica para poder encauzar y estudiar las problemáticas de una manera más pormenorizada.

Este tipo de técnica comienza a ser de interés en muchos países donde se empieza a desarrollar e investigar. El Reino Unido también realiza especiales avances en la investigación de esta técnica vinculante a la ingeniería civil, y lo hace a través de Transport & Road Research Laboratory, cuya línea fue potenciar el refuerzo en puentes con chapas de fuertes espesores, donde se realizaron y contrastaron ensayos en campo y laboratorio.

La primera investigación realizada en España sobre esta línea de investigación descrita en el párrafo anterior fue por (Fernández Cánovas, 1985) en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (I.E.T.C.C.) de Madrid, donde aparece públicas las monográficas, 382 y 383, dentro de la propia institución. Por otro lado, se tiene en cuenta las recomendaciones (Torroja Miret, E., 2007). También se tuvo presente (CNR-DT200_R1, 2013) y (CNR-DT 200 , 2004).

Todos estos esfuerzo vinculados a la investigación a través de ensayos demostraron que un refuerzo proyectado es capaz de cumplir con su misión encomendada, pero en algunas ocasiones, y dependiendo de que circunstancias no fueran capaces de llevar a cabo su función.

En esta nueva línea surgen nuevos materiales dentro del ámbito de la construcción. Uno de los materiales que surgen y que dispone de unas características muy buenas es la fibra de carbono, y además, aparecen nuevas resinas sintéticas con mejores comportamientos mecánicos y con fácil uso en condiciones difíciles. Esta situación da un vuelco enorme en las líneas de investigación siguientes, pero los problemas anteriores siguen existiendo y conviven con los nuevos materiales.

Sin embargo, un país como Estados Unidos históricamente vinculado a la investigación aún no se había pronunciado firmemente sobre estas nuevas técnicas. Uno de sus referentes (Thomas J., 1998) manifestó qué cuando en 1994 entró en el mercado americano hubo divergencia de opiniones entre los ingenieros ya que unos opinaban sobre el refuerzo de fibra de carbono (FRP) que no estaban convencidos de su eficacia, y otros desconfiaban de la misma.

Lo cierto es que en la década de 1990 el refuerzo con tejidos de fibra de carbono disponía de poca normativa e información técnica. Sin embargo, en relación a los encolados con chapas de acero si existía una amplia gama de recomendaciones, y sobre todo mucha investigaciones desarrollada a lo largo de los años (CEB. boletín 162. , 1989) y (GEHO y CEB. Guía FIB de buena práctica , 2008) proporciona indicaciones en este sentido muy útiles para el refuerzo de bandas. Con posterioridad (FIP. Guide to good practice, 1991) publica una guía muy completa sobre la reparación y refuerzo en estructura.

Si realmente existe una recomendación importante es la que surge con posterioridad para el diseño de pegados externos empleando tejidos de fibra de carbono siendo la guía (ACI 440.2R-02, Michigan, 2002). Posteriormente, surgen otras recomendaciones para el refuerzo por confinamiento en hormigón de materiales compuestos, como por ejemplo la guía para diseño y construcción de sistemas FRP (ACI 440.2R-17 , 2008), guía para diseño y construcción de sistemas FRP unidos externamente para el fortalecimiento de las estructuras existentes (CNR-DT200_R1, 2013) guía para el diseño de reforzar estructuras de hormigón empleando materiales compuestos con fibra (Concrete Society TR55 , 2012), y el boletín (FIB Bulletin 14 , 2001) refuerzo de FRP adhesivo externamente para estructura.

2.2 Materiales. Propiedades y compuestos

2.2.1 Hormigón

El hormigón es un material compuesto por un aglomerante (cemento) al que se le añaden fragmentos de partículas (arena, gravilla y grava), agua para producir la hidratación del cemento y/o aditivos. El cemento es pulverulento, pero mezclado con el agua se vuelve una pasta moldeable, lo que hace que sea un material que se pueda adaptar a cualquier forma (encofrados) y endureciendo a las horas de haber sido vertido (proceso de fraguado). A este material se le debe de añadir adecuadamente el acero para convertirse en lo que se conoce como hormigón armado.

Los investigadores (Fernández Cánovas, 1985) y (Swamy and Jones, 1980) realizaron múltiples ensayos a elementos estructurales con materiales de hormigón armado con refuerzo. Una de las conclusiones iniciales a las que llegaron fue que usando hormigones con una resistencia a compresión inferiores a $17,5 \text{ N/mm}^2$, los fallos que se daban eran los producidos por la poquísima adherencia del material que tiene de refuerzo a la superficie del hormigón. Por consiguiente, quedará limitado el uso y empleo del sistema de refuerzo por la técnica de encolado de materiales que dispongan resistentes a la tracción a elementos estructurales con unas resistencias a compresión que sean superiores $17,5 \text{ N/mm}^2$ (XIAO, Q. G. et. al. , 2010).

En el proceso de encolado interviene en la característica porosa del hormigón. En función de su propio valor, el material podría llegar a que el adhesivo de absorbiera completamente en su momento de aplicación, en este caso, que se pudiera dar es estrictamente aconsejable una

imprimación sobre la propia superficie del hormigón. Debemos tener en cuenta que la longevidad de la estructura (en nuestro caso probetas de hormigón) reforzado puede estar condicionada por la propia porosidad del material en este caso el hormigón. No fue viable obtener una especificación sobre la porosidad más idónea.

El peso específico oscila con unos valores entorno a $2.200 - 2.400 \text{ kg/m}^3$, y la densidad varía en cuanto a la cantidad de agregados o áridos utilizados y de las relaciones agua/cemento. Es un material con unas características mecánicas a compresión excelentes, las cuales hacen que este material sea utilizado en numerosas obras estructurales. Debido al módulo en sus estructuras son usadas para aguantar las compresiones, pero si hablamos de su resistencia a tracción, no podemos decir lo mismo; ya que aguanta (entorno a) la décima parte que aguanta a compresión.

Es un material de naturaleza pétreo, es decir, que para su elaboración se usan materiales pétreos, o derivados transformados de éstos. Como la mayoría de las piedras, presenta poros; y es aquí donde se produce uno de los problemas en esta investigación, los poros absorben parte del agua de la resina epoxídica que se le aplica a las probetas de hormigón. La durabilidad de la pieza reforzada puede estar afectada por la porosidad del hormigón, que favorece la migración de agentes agresivos, tanto para el adhesivo como para la banda de acero u otro material. No ha sido posible determinar especificaciones sobre la porosidad admisible.

El cemento empleado en la elaboración de este estudio ha sido el CEM II B- 32,5 R.

2.2.2 Resinas. Formulaciones epoxídicas

El desarrollo de adhesivos a lo largo de los años ha sido muy alto pero esta circunstancia aún no ha permitido que un solo adhesivo sirva para cualquier tipo de encolado. La selección de una adhesivo es una de las cuestiones iniciales que se debe plantear para la ejecución de cualquier estructura. Existen algunos factores iniciales que no se deben pasar por alto, tales como:

- Tipología de materiales que serán encolados.
- Metodología de aplicación.
- Preparación del personal encargado de la ejecución

- Acciones y cargas que soportarán los adhesivos.

La justificación del uso de la formulación epoxídica basada en la ejecución de refuerzo con el pegado de una armadura que sea adicional vendrá permitido por una alta adherencia en aquellos soportes de hormigón y materiales de adherencia, capacidad de endurecimiento rápido e irreversible, que dispongan de una estabilidad dimensional y sobre todo una alta resistencia a los ataques de agentes químicos además de resistencias mecánicas idóneas, etc.

La combinación resultante de dos o más componentes principales, por un lado la parte epoxídica y por otro el endurecedor, es lo que conocemos normalmente como formulación epoxídica. Tienen también otro nombre que se emplea en bibliografías y/o fabricantes más conocidos como resinas epoxi. La reacción química a la que hace alusión es la epioridrina sobre el bisfenol, siendo estos productos considerados por sus composiciones de condensación.

La segunda parte del compuesto los conocidos como endurecedores son amidas, aminas y tiokoles. Desde el punto de vista químico son moléculas orgánicas con un elevado índice de grupos reactivos, lo que tiene como conclusión un endurecimiento sobre el conjunto, efecto deseado. En función del efecto que busquemos será más aconsejable un tipo de endurecedor que otro para la formulación final del mismo.

Entrando en este conjunto de formulaciones químicas podremos actuar de forma que podremos modificar propiedades tales como la viscosidad y solubilidad del agua, y características mecánicas, siempre añadiendo determinadas cargas de producto. La tipología de estas cargas normalmente vienen en polvo, y suelen ser de carácter insoluble y mineral (Miravete, A. , 2000).

La manipulación de estos productos debe ser precisa y cuidadosa, no obstante, se podrá añadir una coloración con pigmentos inorgánicos los cuales debido a sus características nos permitirán una compenetración adecuada entre los mismos. Estos productos disponen de una variabilidad de propiedades físicas dentro de un amplio espectro, y teniendo en cuenta la utilización de cada adhesivo.

Estos materiales son muy versátiles, y de ello dependerá el uso o aplicación que se le pretenda dar. Esta multitud de combinaciones hacen que los adhesivos no sean universales sino más bien lo contrario. Las características que se deben exigir a un adhesivo para ser usado adecuadamente en un refuerzo son las siguientes:

- Fácil mezclado, fácil aplicación mediante llana o rodillo.
- Muy buena aplicación tanto en superficies verticales como en techos.
- Muy buena adherencia a gran variedad de soportes.
- Tiempo de endurecimiento máximo una semana.
- Adhesividad. Parámetro que sirve para obtener resistencia de rotura entre la unión de soporte adhesivo y adhesivo refuerzo. La tensión de rotura superará $2,5 \text{ N/mm}^2$.
- Altas propiedades mecánicas.
- No necesita imprimación.
- Temperatura de servicio: $8 - 40^\circ \text{C}$.
- Resistencia a compresión: $85 - 90 \text{ N/mm}^2$.
- Resistencia a cortante: $15 - 19 \text{ N/mm}^2$.
- Resistencia a la flexión superior a 40 N/mm^2 .
- Resistencia a tracción superior: 30 N/mm^2 .

El adhesivo debe ser lo suficiente rígido para poder transferir los esfuerzos adecuados entre el propio material de refuerzo y la estructura determinada de hormigón durante el tiempo para el que fue determinada. Es de vital importancia que el módulo de elasticidad tangente deba ser en la medida de lo posible lo más cercano a los materiales de unión. Se tendrá en cuenta que los módulos de elasticidad del hormigón son de diferente magnitud al de los adhesivos. Se admite un valor mínimo de 4.500 N/mm^2 según (Bresson and Beton Plaqué, 1972) aunque en la realidad se emplean con los adhesivos unos 9.000 N/mm^2 . Según los ensayos realizados por de (Fernández Cánovas, 1985) se emplean módulos de rigidez superiores a 5.000 N/mm^2 . La rigidez se fija en función de las solicitaciones que se producen siendo estas térmicas o dinámicas. En el caso de los ensayos realizados por (Fernández Cánovas, 1985) las solicitaciones fueron de larga duración.

En las solicitaciones térmicas debemos asegurar que existe un trabajo mutuo y solidario entre el hormigón y el propio material de refuerzo, esas temperaturas oscilaran entre -20°C y 60°C .

En estos casos habrá que tener en cuenta las condiciones de servicio pudiendo ser estas excepcionales o normales.

En el caso de los adhesivos deben ser resistentes al ataque de factores químicos que puedan existir en el ambiente en el que el propio refuerzo conviva, además de ser inerte al hormigón y a los propios soportes del refuerzo. Las afecciones que puedan derivarse de los factores y/o acciones químicas están vinculadas a poder ser capaz de absorción de agua. Normalmente, la absorción de agua esta entorno al 2%. Los ensayos se realizan en una probeta de relación superficie / volumen de 22 cm^{-1} , y con las situaciones con las del adhesivo se encontrará siendo agua sulfurosa, cloruro sódico, hidróxido sódico, cloruro cálcico y la propia escorrentía.

La baja viscosidad de las resinas de imprimación son diseñadas con un propósito muy concreto que es cerrar los poros en la superficie hormigonada. El proceso consiste en limpiar adecuadamente la superficie del hormigón penetrando ciertamente en el propio hormigón, y aumenta la adhesión del tejido de fibra de carbono. La imprimación del tapaporos está compuesto por dos componentes por un lado el componente activo y por otro el endurecedor, los cuales están envasados separadamente y que deben mezclarse en el momento de ser aplicadas.

El uso de estos compuestos tienen como connotación que su proceso de mezcla se realice en las cantidades indicadas por fabricante, y además, teniendo en cuenta el tiempo que se usará ese producto y el tiempo que puede estar abierto el mismo en contacto con el propio ambiente. Existe un factor que se debe de tener en cuenta, y es la temperatura a la hora de usarlo ya que mientras en periodo de verano las temperaturas pueden oscilar entre 15° y 35°C , en invierno pueden oscilar entre 5° y 15°C . Las irregularidades superficiales para relleno de coqueras se usan pero solo son validas para superficies menores a 0,5 cm.

En este proceso la resina y/o adhesivo es el material que va actuar como unión y transmisión de acciones entre las láminas de fibras de carbono y el propio hormigón. En consecuencia, las propiedades mecánicas son importantes para obtener una mayor eficacia en el propio refuerzo. La resina tiene como misión fundamental hacer el efecto de pegar el refuerzo en la propia superficie del hormigón, y crear una mezcla de características mecánicas que sea capaz de poder transmitir los esfuerzos necesarios del hormigón a los tejidos de fibra de carbono.

Es fundamental que la resina disponga de una buena adhesión al hormigón y tejido, además de unas características reológicas y mecánicas adecuadas.

Figura nº 2-2. Aspecto de la resina utilizada después de mezclar sus componentes.

Recibe el nombre de reticulación al proceso de endurecimiento que sucede en la resina. Desde el punto de vista de proceso las resinas denominadas termoestables se forman por cadenas tridimensionales entrelazadas. Dada esta circunstancia, no existe flexibilidad entre las moléculas y por lo tanto, no se podrá fundir ni volver a moldear para volver al estado inicial una vez que han sido endurecidas. Este proceso tiene como consecuencia que cuantas más cadenas tridimensionales participen y se entrelacen mayor rigidez tendrá el producto, y en consecuencia, mayor temperatura en su transmisión habrá. Estas son algunas de las razones por las cuales es importante trabajar con resinas que tengan temperaturas termoestables. Este tipo de resinas termoestables tiene su origen en el refuerzo estructural por que disponen de una buena rigidez, una alta resistencia química y eléctrica, una alta resistencia dimensional y térmica, y una de las cuestiones más vitales es la impregnación de los tejidos de fibra de carbono.

2.2.3 Tipología de Fibras

El origen de los materiales compuestos con resinas responde a una casualidad y a la curiosidad investigadora que por simple que sea nada es desdeñable en investigación. Se produjo un vertido de resina sobre un tejido de fibra de vidrio (Restrepo, J.I., and Vino, B.D. , 1996), y alguien pensó que con esa mezcla se podrían realizar ensayos y observar esas características mecánicas. Éste fue sin duda el comienzo de la existencia de los composite o

refuerzos plastificados. Estos materiales son los que usamos en la actualidad, y los podemos encontrar en cualquier lugar.

Con todo ello, se diseñó un nuevo material que se emplearía en la construcción. Este material reuniría las moléculas de origen orgánico en su forma de polímero, y sus propiedades habían sido diseñadas anteriormente con fibras sintéticas o naturales previamente conocidas. Esta estructura conjunta proporcionó una relación resistencia/peso que sin duda no había sido conocida hasta ese momento. Esta relación dio lugar a un pensamiento diferente e innovador en el ámbito de las estructuras ya que se podía medir y comprobar determinados comportamientos llegando estos a ser controlados.

Figura nº 2-3. Micrografías muestra de fibras de vidrio en una matriz polimérica.

La unión de dos o más materiales con unas características mecánicas y físicas diferentes reciben el nombre de materiales compuestos. El objetivo de esta unión es conseguir un nuevo material que sea capaz de optimizar las características de cada uno.

Según el investigador (Dante Espeche, 2007) el cual habla muy bien de estos materiales, “comenta que en un alto porcentaje los materiales que son naturales obtienen sus propiedades por la combinación de los propios materiales pudiendo ser dos o más. Existen ejemplos como puede ser el cuerpo humano con sus tejidos que ofrecen elevada resistencia y son flexibles”. También existen otros ejemplos según el propio (Dante Espeche, 2007) “significativos como puede ser los propios árboles que poseen una estructura fibrilar dada por la celulosa, siendo la lignina el polímero que forma paredes naturales y aporta la resistencia necesaria para la unión entre ambos”.

Es el propio autor quien pone de ejemplo las propias hojas de bambú, las fibras de los árboles por su composición fibrilar siendo la lignina el polímero natural aportando un refuerzo único

y necesario entre ambos. En la figura nº 2-4 se puede observar las fibras a las que se hacen referencia.

Figura nº 2-4. Imagen de fibras de bambú.

Estos materiales han sido muy usados desde hace cincuenta años en industrias donde existe una altísimo grado de investigación como es la industria aeronáutica, ya que aprovecha la enorme ventaja de unión de materiales y el poco peso de los mismos. Con el tiempo estos materiales se fueron incorporando en otras industrias como las telecomunicaciones, automóviles etc.

La primera vez que se empezó a usar en la construcción mediante pruebas fue en los años ochenta, concretamente en el EMPA (Laboratorio Suizo de Materiales) en Zürich, y posteriormente se publicó por (Mier, et. al., 1992) su investigación sobre materiales compuestos en Suiza. El objetivo era comprobar que esos materiales servirían para el refuerzo de estructuras de hormigón armado. Esto supuso un cambio de concepto ya que hasta ese momento solo se había usado empleando el método de (L'Hermite. Annales ITBTP nº 529, 1994) de chapas de acero pegadas con resina epoxi.

En el ámbito de la construcción, normalmente están formados por dos materiales o dos componentes, matriz y fibra, que están trabajando de manera solidaria y conjunta. El objetivo es obtener unas prestaciones mecánicas conjuntas que sean óptimas.

Existen diferentes tipos de fibras tales como carbono, vidrio, aramida etc., que sirven para el uso del que trata la presente tesis, aunque sin ninguna duda las más extendidas son las fibras de carbono. Estas fibras de carbono disponen de un módulo de elasticidad muy alto el que más de todas las fibras mencionadas anteriormente, más compatible con la deformación del hormigón armado, la más cara, y la que mejores prestaciones proporciona. A pesar de disponer de las mejores prestaciones se deben de valorar más factores para poder seleccionar la fibra más adecuada como pueden ser los aspectos ambientales y la tipología de carga.

Figura n° 2-5. Distintos tipos de tejidos fibra carbono, aramida, y vidrio.

Las características iniciales del material fibra no serán las mismas cuando se impregne con la matriz polímera en el desarrollo del nuevo material que se empleará en el refuerzo de probetas de hormigón, ya que como se explicó anteriormente, son dos materiales que interactúan simultáneamente.

Tabla n° 2-1. Característica mecánicas tipologías de fibras.

Tipo de Fibra	Módulo de Elasticidad(GPa)	Resistencia a la Tracción (N/mm ²)	Deformación de Rotura (%)
Carbono			
Alta Resistencia	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Súper alta Resistencia	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto Módulo	250-500	2500-3100	0,5-0,9
Súper alto Módulo	500-700	2100-2400	/0,2-0,4
Vidrio			
E-Glass	70	1900-3000	3,0-4,5
S-Glass	85-90	3500-4800	4,5-5,5
Aramida			
Bajo Módulo	70-80	3500-4200	4,3-5,0
Alto Módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5

Esta demostrado que la resina epoxi es la más compatible con la fibra de carbono, siendo la que mejora las fibras de carbono y proporciona una mayor adherencia. Esta mezcla dispone de una característica de vital importancia en el proceso, y es que el curado no genera ningún tipo de retracción y/o expansión, que ayuda al uso para el que esta destinado.

En los materiales compuestos para poder entender su funcionalidad es imprescindible poder conocer cada uno de los componentes de los que forma el conjunto. Las funciones principales de las fibras de carbono están vinculadas a tener una conductividad o aislamiento eléctrico, un elevado módulo elástico, y disponer de una resistencia frente a esfuerzos de tracción.

En este caso, es la matriz la que arroja aquellas propiedades necesarias en los materiales compuestos aumentando su rendimiento obligando así a trabajar de forma conjunta a la fibra de carbono, y trasladando así todos los esfuerzos de tracción.

De esta manera, se mantiene un aislamiento entre fibras para poder trabajar de manera separada. Esta circunstancia evita incluso que se produzca una desaceleración en la distribución de fisuras en el soporte.

Uno de los materiales más extraordinarios por su versatilidad es el propio carbono. Desde el punto de vista químico el carbono es de vital importancia para la vida humana. Su descripción consiste en que cada filamento de carbono es la unión de filamentos de forma de hebra. Sus dimensiones son de entre 4 y 8 micrómetros, realmente pequeñas tal y como refleja la figura nº 2-6.

Figura nº 2-6. Filamento comparado con pelo humano

La diferencia que se puede encontrar en esta tipología está centrada en cómo se entrelazan las hojas. También destacar que las uniones entre hojas son débiles. Destacar que la fibra de carbono es un material disforme ya que los átomos que componen el carbono están apretados. Esta circunstancia que resulta de la integración de las hojas previene el corrimiento entre las capas e incrementan su resistencia. Por ello, se puede afirmar la composición estructural atómica de la fibra de carbono es parecida a la del grafito. Los átomos de carbono están distribuidos mediante un patrón hexagonal. En este caso, la diferencia existente corresponde más a la forma de cómo se entrecruzan y/o entrelazan las propias hojas.

La formación de fibras de carbono y de grafito suelen estar compuestas principalmente por una serie de materias primas muy específicas. Dichas materias son las siguientes:

- PITCH. Son fibras que se obtienen normalmente por medio del petróleo purificado o la brea de alquitrán.
- PAN. Son de fibras de origen textil y de tipo poliméricas.

Las fibras con tipología Pitch suelen aportar una mayor rigidez aunque son más débiles y frágiles rompiendo en caso de elongaciones. En el caso de las fibras de tipología Pan son las que más suelen emplearse ya que sus diámetros están entorno al 5 y 7 micras o micrómetros, y la de tipología Pitch oscilan entre 10 y 12 micras.

Se usaran temperaturas muy elevadas para la fabricación de las materias primas expuestas a oxidación, además, como pasan en otros procesos de fabricación, en este caso pasan por gratificación y carbonización. En consecuencia, este proceso de fabricación tiene como objetivo principal que al tener unos cambios en sus composiciones químicas aportaran unas mayores oscilaciones de ratios en su rigidez-peso, y resistencia en la relación peso-tracción.

Este elemento conocido como fibra de carbono dispone de unas ventajas que son realmente magníficas para el uso de materiales que sean requeridos para realizar refuerzo. Los investigadores durante todos estos años han llegado a tabular de manera aproximada las resistencias y características de las fibras de carbono incluso comparándolas con otros materiales. Por ejemplo, unas ventajas importantes es que la fibra de carbono dispone una resistencia mecánica tres veces superior al del acero, y una baja densidad de cuatro puntos y medio sobre el acero, y una de las cuestiones más destacables que es su gran resistencia a la corrosión. Tanto las ventajas mencionadas como algunos inconvenientes serán estudiados a lo largo del presente documento.

Debemos destacar que el CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) dispone de un comportamiento frente a la rotura bajo carga que está muy por encima del resto de materiales compuestos. Para poder llegar a esta conclusión y afirmación se han realizado multitud de ensayos dependiendo de donde se hubiera de usar ese refuerzo.

En caso del uso de CFRP se han podido constatar que estos esfuerzos sometidos a tracción bajo carga teóricamente de servicio pueden alcanzar unos resultados máximos de entre el 20% y 25% de resistencia en un periodo relativamente corto. Tenemos en cuenta que se plantea la consideración por pérdida de resistencia como resultado de mantener la carga.

En los casos en los que los materiales compuestos estén formados por fibras de carbono llevan inherente una resistencia a la fatiga importante. Uno de los ejemplos pioneros en este sentido fue el realizado en Japón donde se emplearon tensiones máximas de hasta un 87,5% en resistencia a tracción en un periodo corto plazo y amplitud de hasta 1000 N/mm², obteniendo más de 4x10⁶ ciclos de carga.

Teniendo en cuenta el caso que estamos estudiando sobre las CFRP la fluencia y relajación presentan comportamientos visco-elásticos. Teniendo en cuenta que las fibras de carbono por si solas no presentarían una pérdida de tensión como resultado en la relajación durante la carga mantenida en su estado de servicio. Sin embargo, la resina epoxi es visco-elástica aunque se puede considerar que la resina empleada es elástico lineal llegando a un valor en deformación de tracción de $\pm 20\%$.

Los volúmenes normales de la matriz están rondando en el entorno de $V_m = \pm 30\%$, y la relación con el módulo de Young (E_f / E_m) = 30, estos resultados muestran que la absorción de las fuerzas en la tracción en el caso de la matriz no sería superior al 0.5% de la fuerza total de la tracción. Por esta misma razón se puede despreciar sin duda la fluencia de la matriz despreciándola que sería de igual modo pequeña para los módulos de carga. Otra connotación que se menciona es que no existe una correlación entre resistencia y tiempo para las fibras continuas, y el refuerzo de tracción que es paralelo a las fibras.

Aunque ya se comentó anteriormente la fibra de carbono tiene sus inicios en la industria espacial aunque poco a poco se fue evolucionando y reclamada por otras industrial. Un ejemplo claro de industrias que reclamaron este producto fueron la industria del transporte, el deporte, la construcción etc., ya que su bajo coste y resultados en relación a otros materiales valían la pena.

En el caso que nos atañe en el documento que presentamos, y cuya vinculación es directa con las estructuras de edificación y obra civil, se logró la sustitución progresiva de los refuerzos

conocidos como tradicionales en el sector, siendo estos; los zunchados metálicos, recrecidos de hormigón, pletinas, etc.). Estos se sustituyeron por otras como los refuerzo de fibra de carbono y la propia aramida, aunque realmente lo que se usa en la fibra de carbono.

Esta circunstancia se presta porque la fibra de carbono es un elemento de relativa facilidad de poner en obra, es barato, y sus características mecánicas como son el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción, y que dispone de unas deformaciones que pueden llegar a ser como las de las barras de acero de una estructura. Por lo tanto, el comportamiento es como si fueran barras longitudinales de acero en las zonas sujetas a tracción o cercos zunchados o incluso absorber pequeños paquetes de esfuerzos cortantes. La consideración más importante en este caso es saber que el refuerzo de fibras de carbono trabajan en un solo sentido de manera unidimensional, y siempre en el sentido de las fibras.

Es conveniente tener presente que las características mecánicas que la fibra de carbono presenta son superiores a las del acero y el hormigón. Esto quiere decir que el éxito de este proceso esta más en la preparación previa en relación al soporte que el material del refuerzo.

Cabe la posibilidad de aumentar la capacidad portante de un elemento estructural en esfuerzos cortantes, compresiones, flexiones, tracciones etc, teniendo en cuenta una disposición de composite como son lo que fabricados mediante fibra de carbono, y que son los que realmente servirán para aumentar dicha capacidad portante. La forma análoga de ejecución es muy similar a como funcionan las armaduras longitudinales y estribos transversales, pero con la gran ventaja que tenemos de poder trabajar directamente sobre la base de los hormigones que ya están endurecidos y/o puestos en obra. El método es sencillo y rápido ya que se aplican sobre el hormigón con un espesor que oscilan entre uno y dos milímetros.

Existen dos formas de obtener composite, y ambas se usan en la comercialización actual en función de las necesidades (Miravete, A. , 2000). El composite se puede obtener mediante un laminado de compuesto por planeidad homogénea y riqueza en carbono especialmente controlado, o por el contrario mediante la ejecución in situ de laminados (M. Brace, 2007) sobre la propia estructura, en este caso permite adherirse a superficies geométricamente no rectas como son los tejidos de fibra (figura nº5-7).

Figura nº 2-7. Laminados y rollos de tejidos de fibra de carbono.

Según la figura nº5-7, el segundo de ellos, son materiales que vienen con formas de laminas en las que se incluyen fibras como elemento resistente y la resina. Estos materiales tiene un espesor de entre 1,2 y 1,5 milímetros, y disponen de una anchura media de entre 5 y 20 centímetros. Normalmente, se suelen presentar en rollos mínimos que van desde 100 metros llegando incluso a las 500 metros siempre lineales, que posteriormente son manipulados y cortados en obra según convenga. Es evidente que este material es adherido con su resina epoxi que esta compuesta normalmente por dos componentes uno de alta tixotropía y otro pastoso, necesarios para poder ser colocados en cualquier superficie ya bien sea paredes o techos. En la tabla nº2-2 se puede observar las características generales.

Tabla nº 2-2. Características generales de un laminado de fibra de carbono.

LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO	
Módulo de Elasticidad (N/mm ²)	165000
Resistencia a la Tracción (N/mm ²)	2800
Deformación de Rotura %	17
Contenido Volumétrico de Fibra %	>68
Espesor (mm)	1,2

Sin embargo, los materiales para tejidos de base de fibra de carbono que aún no disponen de la colocación de matriz de resina suelen disponer de entre un 95 a 98% de fibras en dirección longitudinal, y entre 2 y 5% en la dirección transversal para efectuar la unión y evitar así el deshilachado de manera longitudinal. Estos tejidos de carbono disponen de un espesor de entre 0,11 hasta 0,30 milímetros, tiene un gramaje que oscila entre 200 y 800 g/m². Otra de las características tienen un ancho de entre 300 y 600 milímetros y los rollos suelen estar comprendidos entre 50 y 100 metros que al igual que en el caso anterior se suelen cortar en

obra con las medidas deseadas. Sus características principales se adjuntan la Tabla nº2-3. Siempre que se desee poner en obra este proceso se utilizará las resinas epoxi fluidas.

Tabla nº 2-3. Características generales de los tejidos de fibra de carbono.

TEJIDOS DE FIBRA DE CARBONO		
TIPO	BAJO MÓDULO	ALTO MÓDULO
Módulo de Young (N/mm ²)	230.000	440.000
Resistencia a la Tracción (N/mm ²)	3.400	2.400
Deformación de Rotura (%)	15	5,5
Peso (g/m ²)	200-300	300
Espesor (mm)	0,11-0,16	0,16

Estas últimas fibras de carbono descritas son las que emplearemos para realizar el trabajo experimental de las probetas de hormigón teniendo en cuenta que los tejidos son unidimensionales de pequeño espesor lo que posibilitará el pegado de esta fibra en zonas complicadas. Esta circunstancia también permitirá colocar capas superpuestas hasta que alcancemos un grosor que deseemos.

Existe otro formato de fibras de carbono que son las que están compuestas por barras de fibra de carbono que son impregnadas en resina epoxi conformada mediante un proceso conocido con el nombre de pultrusión. Son barras ligeras y muy manejables en la ejecución de obras, además, no son susceptibles a la corrosión incluyendo la posibilidad de ser pretensadas cuestión que con otros materiales como es el acero si pasa.

2.2.4 Fabricación de fibras

En la actualidad se disponen de multitud de procesos en relación a la fabricación de fibras de carbono, y en consecuencia de materiales compuestos, tal y como se indica en (Miravete, A. 2000). Como ya se ha ido comentando a lo largo del presente documento los FRP disponen de diversos usos entre ellos en el ámbito de la edificación y/o construcción. Para ello, existen diversas técnicas y/o métodos de fabricación siendo estos principalmente por “pultrusión y modelo de contacto manual”.

2.2.4.1 Pultrusión

Consiste en una técnica que trabaja de manera automática y continuamente de modo que se obtienen unas secciones de alta calidad, y con bastante contenido de fibra que suele estar entre el 60 y 70%. Es habitual la fabricación de FRP mediante esta técnica, y además, con cierta variedad de tipología de formas. En la figura nº2-8 se puede observar la fabricación de FRP en relación con la técnica de la pultrusión.

La técnica consiste en estirar las fibras que normalmente suelen estar enrolladas adecuadamente, pasan por un baño de resina para ser impregnadas, y posteriormente son distribuidas y preformadas para poder obtener la forma deseada según el molde necesario. Acto seguido, y siguiendo el propio proceso, se introducen en un molde el cual dispone de la forma que deseamos y se polimeriza la resina con una técnica dentro de un proceso térmico con presión para posteriormente ser enfriado con agua y temperatura ambiente. Por último, y de manera automática, es cortado a la medida deseada según propósito final.

Figura nº2-8 Fabricación de FRP relacionado con la pultrusión.

2.2.4.2 Técnica de contacto manual

La técnica de contacto manual pueden ser varias entre ellas hand-lay-up o wet-lay-up, siendo estas las técnicas más tradicionales en la propia fabricación de materiales compuestos. En el punto 4.1 dentro del programa de experimentación de la presente tesis se habla sobre la aplicación de esta técnica. Consiste en poner de manera manual el molde de la fibra orientándola en la dirección que sea necesaria e ir incorporando la resina epoxídica, de ese modo se fabrica el propio material compuesto en ese momento, es decir, in situ. En estos casos el curado suele producirse con total normalidad en la propia temperatura ambiente.

2.2.4.3 Proceso de enrollamiento

Es un proceso que consiste básicamente en que las propias bandas de fibra se enrollan sobre un cilindro y/o mandril rotatorio que suele ser impregnado con resina de manera longitudinal. Normalmente, las velocidades en estos procesos suele estar adecuadamente sincronizadas para poder asegurar de manera precisa el proceso de enrollamiento.

2.3 Ejecución del proceso

2.3.1 Tratamiento del hormigón

Antes de comenzar el proceso de adhesión entre el tejido de fibra de carbono con la resina sobre la superficie del hormigón debemos de conseguir que la superficie este limpia y seca. Por otra parte, destacar que la formulación epoxídica sobre el hormigón es un fenómeno tal cual de tipo mecánico donde intervienen tanto la porosidad del propio soporte como la situación de la superficie. Debemos tener en cuenta que la adhesión dispone de una tipología química de fuerzas moleculares, y que son intervinientes en la tensión superficial del soporte.

El tratamiento del hormigón en su relación con la superficie tiene una finalidad que es conseguir una limpieza y rugosidad lo más idónea posible para poder eliminar aquellas partes del material que pudieran estar más débiles. Otra de las características importantes para poder ejecutar el refuerzo sobre el hormigón es que dicho hormigón este en buenas condiciones y totalmente libre de posibles impurezas para poder realizar el proceso de adhesión. Esto quiere decir que podremos hablar de hormigones que son viejos o más nuevos en función de los años que tengan, y esta característica pudiera influir, y por lo tanto, la tendremos en cuenta.

Siempre se realizará un estudio previo de las superficies, y lo normal en las obras es encontrarse hormigones viejos y con cierto grado de deterioro. En estos casos se deberán de examinar la carbonatación, presencia de yesos y aglomerantes bituminosos pero también hay que saber el grado de corrosión que podemos encontrar en las armaduras pasivas, residuos de silicona, antiguas capas de resinas, o incluso aceites.

Por todo lo anterior debemos de realizar estudios de previsión de los elementos estructurales que deseamos reforzar, ya que todas las características que hemos mencionado deben ser

subsanadas en la medida de lo posible. En este proceso de limpieza de impurezas y eliminación de materiales sueltos sobre la superficie del hormigón, es muy posible que la superficie pudiera quedar húmeda lo cual imposibilitaría el proceso de adhesión. Se recomienda siempre que cualquier superficie de hormigón que vaya a ser reforzada debe estar seca para el uso de esta tipología de resinas epoxi. En el caso de que la superficie del hormigón este húmeda su secado podrá realizarse por medios naturales o artificiales. Sin embargo, el desecado manual emplea aire comprimido teniendo que usar filtros de partículas específicos. La normativa (ACI 440.2R-08 and ACI 440.2R-17, 2008) aconseja que se usen calentadores existiendo diferentes tipos pero los más usados son radiantes.

En el momento que se han eliminado las alteraciones superficiales es necesario asegurar una planeidad para asegurar debidamente los refuerzos, de este modo, evitaremos alteraciones en el espesor del adhesivo y disiparemos los esfuerzos aplicar. Pudiera darse la circunstancia que existan alteraciones con la existencia de burbujas, en este caso, es necesario realizar las operaciones de mantenimiento adecuadas para dejar la superficie en unas buenas condiciones para el empleo del refuerzo. Es habitual usar morteros llamados de reparación y que son compatibles con los productos que se emplearan en esa superficie. Por otro lado, es aconsejable que la superficie de reparación no ascienda al 20% ya que se podría conseguir el efecto contrario.

Aunque no es el caso de objeto a estudio se podrá indicar que existe un aspecto importante sobre las esquinas de secciones rectangulares o cuadradas. En dicho caso, siendo perpendiculares a la dirección del tejido de fibras de carbono nunca debe ser inferior a 2 cm aunque lo recomendable es que no sea inferior a 5 cm (YANG, X. et. al. , 2001). Se adjunta la figura nº2-9 donde se puede observar la representación.

Figura nº 2-9. Representación de resistencia en función de radio.

Una de las características más importantes de los tejidos de fibra de carbono es su resistencia a tracción, pero siendo conscientes de que dispone de una deficiente resistencia a las compresiones provocado por su elevada esbeltez. Otro de los motivos por lo que no se puede confiar en la fibra de carbono en relación a su capacidad para la compresión es que si ésta estuviera adherida pudiera despegarse, por este motivo no se disponen de fibras paralelas a la compresión. En el caso de estructuras circulares como son los pilares se podrían usar las fibras de tejido de carbono aplicándola perpendicularmente al propio esfuerzo de compresión, lo que se conoce como zunchado. Este efecto permite disminuir las deformaciones transversales teniendo en cuenta el efecto de Poisson del propio hormigón. En consecuencia, aumentaríamos la capacidad portante del propio soporte. Siempre que apliquemos la técnica de tejidos de fibra de carbono sobre superficie tendremos que tener en cuenta un solape mínimo de 20 centímetros. En la figura nº2-9 se puede observar esta característica.

Figura nº 2-10. Dimensiones de los solapes 20 cm. Colocación tejidos de fibra de carbono.

Una de las cuestiones más importantes en este proceso de refuerzo de tejidos de fibra de carbono en las probetas de hormigón es disponer de un solape mínimo de al menos 20 cm en la dirección en la que se colocan las fibras, en la figura nº2-10 se puede observar la funcionalidad. En el proceso de refuerzo se puede dar la casuística de que existan varias capas pero en ningún caso ambos solapes deben ser coincidentes. Normalmente, el sistema de refuerzo debe usarse en hormigones que estén correctamente sanos y secos, y el objetivo que tienen es aumentar su capacidad resistente ante las acciones mecánicas. Es importante tener presente que este sistema no sirve para poder resolver determinados problemas de la estructura como la durabilidad, afecciones de agua por sellados, frenado de corrosiones etc.

En consecuencia, si la superficie del hormigón donde pretendemos aplicar el refuerzo no esta en condiciones optimas o esta húmeda el adhesivo que pongamos fallará. También puede ocurrir que el hormigón no se encuentre mojado pero exista una humedad, dicha circunstancia podrá afectar ya que es posible que la adhesión no se haga adecuadamente pudiendo despegarse. Por ello, es de vital importancia tener perfectamente controlado el parámetro de la humedad. Una vez que la humedad ha desaparecido la afección del agua no nos afectará. Otra de las recomendaciones es que cuando vayamos a realizar la ejecución del refuerzo no debe existir polvo, y la zona debe estar en la medida de posible muy protegida. En el caso de un laboratorio los ensayos se pueden ser controlados muy bien pero en el caso de una obra si esta circunstancia no fuera posible debemos de intentar cubrir esa zona de trabajo hasta que se produzca el endurecimiento de la resina epoxídica.

En estas ejecuciones de refuerzo con tejido de fibra de carbono y resinas epoxídicas existen una serie de recomendaciones que se deben de cumplir siendo estas:

- El carbono (láminas) es un perfecto conductor de electricidad, por lo tanto, se deben de tomar las medidas que no entren en contacto con cables eléctricos.
- La mezcla que se utilice no debe superar 2 kg ya que las reacciones químicas que se forman son elevadas en el momento del endurecimiento.
- Se recomienda el uso de guantes de goma y de obra, gafas protectoras, bata, mascarilla e indumentaria adecuada para desarrollar el trabajo.
- La zona de trabajo debe estar ventilada para evitar inhalar vapores etc.
- Evitar hacer fuego en los alrededores de los materiales.

2.3.2 Fabricación. Modelo Manual

En este tipo de encolados y adhesiones se emplean dos componentes por separado a lo que posteriormente se añaden cargas. Las formulaciones normalmente suelen estar en envases metálicos y/o de plástico donde su forma esta lista de manera pre-dosificados. La forma de empleo consiste en coger un cuenco bien metálico y/o plástico, y verter tanto el contenido de la resina como del endurecedor.

Existen varias formas de mezclar ambos componentes una de ellas y que es muy utilizada consiste en emplear agitadores eléctricos con velocidades constantes y bajas evitando la

entrada de aire. Cabe la posibilidad de emplear hasta tres componentes, no pasaría nada ya que las cargas se vierten después mezclando resina y endurecedor. Preferiblemente, el tiempo de mezcla de dos componentes no suelen superar los dos minutos, y en el caso de tres componentes suele no ser más de cinco minutos.

Se recomienda que cuando comience el adhesivo aplicarse al soporte las temperaturas deben ser superiores a 5°C, y la humedad relativa inferior al 80%. Normalmente, se realizan estudios de la tipología estructural donde se pretende aplicar el refuerzo, en ese caso, y observando que el hormigón este viejo, fisurado o sea poroso se debe de impregnar inicialmente al hormigón con una resina epoxídica fluida que será extendida con brocha o rodillo para asegurar posteriormente la impregnación del refuerzo en una imprimación que aún sigue siendo activa. Siempre se extenderá una capa de adhesivo sobre cada elemento y refuerzo que deseemos unir, y esto se ejecutará a lo largo de la superficie objeto.

2.3.3 Durabilidad

Un refuerzo basa su durabilidad en la cantidad de protecciones que puede llevar alojado. Esta técnica lleva ejecutándose desde hace más de treinta años. La comercialización de la fibra de carbono o barras lleva investigándose desde hace cincuenta años, y hasta la fecha no se han registrado fallos de durabilidad. Se tiene constancia de investigaciones y estudios de ensayos basados en el envejecimiento con una exposición natural que hacen indicar que la durabilidad en estos materiales no se ve influenciada.

Lo que si se puede demostrar es que este tipo formulaciones epoxídicas es que en las condiciones de servicio en relación a la temperatura influyen mucho en el adhesivo, y por ello, no se recomienda que la temperatura de la capa del propio adhesivo no supere 45° C. Es muy importante tener manejo en la ejecución, y evitar así condensaciones que pudieran llegar a afectar produciendo posibles corrosiones.

Otro de los factores que influyen en la realidad de la vida útil de las estructuras en su comportamiento ante el fuego. El objetivo de los elementos estructurales que están protegidos con el fuego es que lo estén durante un periodo mínimo para que durante el siniestro o suceso se pueda producir una evacuación de personas ordenadamente. Normalmente, ese tiempo estimado de refuerzo de los elementos estructurales no suele superar los treinta minutos, es el

tiempo máximo que dispondríamos para poder proceder a una evacuación adecuada. La resistencia a la que puede estar sometido la resina epoxi en relación al impacto calorífero oscilará entre los 60 y 80° C. A partir de esas temperaturas todas las características bajarían considerablemente su rendimiento incluyendo las mecánicas, y sobre todo las de cizallamiento a tracción tan importantes para el propio soporte.

Cabe la posibilidad, y según el tipo de estructura soporte que sea necesaria protección contra el fuego se podría aconsejar el uso de paneles. Estos paneles disponen de unos espesores relativamente pequeños, y que sin duda alcanzan la protección mínima para poder conseguir el objetivo. Estos paneles deben estar bien pegados ya que sino lo estuviesen un escape de gas podría entrar entre los paneles y el soporte de hormigón.

Ámbitos de aplicación

El material de fibra de carbono es un elemento que como ya se ha ido comentando a lo largo del presente documento es muy utilizado en el ámbito de la construcción. Examinamos los ámbitos de aplicación más destacados y las causas para las que se realiza el refuerzo, siendo estos:

Elementos de la propia estructura dañados:

- Siniestros (entre los que se encontrarían los sísmicos).
- Posible corrosión de la parte metálica.
- El propio envejecimiento.

Aumento de las cargas de acción:

- Frecuente cambio de uso de la estructura.
- Excesiva vibración de la estructura.
- Aumento de la carga viva en los depósitos.
- Incremento en el tránsito en los puentes.

Alteración del sistema de la estructura.

- Eliminación de pilares.
- Patologías en sección.

Diseño y construcción mal dimensionada.

- Falta de cantidad de aporte de acero.
- Falta de dimensionamiento de elemento estructurales.

Aumento de las capacidades portantes de la estructura.

- Disminución de las fisuras.
- Disminución del esfuerzo del acero.

El empleo de refuerzos de tejidos de fibra de carbono CFRP es muy extenso. Señalaremos instalaciones y zonas donde se pueden usar, siendo estas:

- Plantas de tratamiento de agua residual.
- Plantas de tratamiento de agua potable.
- Depósitos de abastecimiento.
- Tanques de Tormenta.
- Torres de enfriamiento de agua.
- Elementos estructurales expuestos a salinidad.
- Plantas de tratamientos de procesos químicos.
- Instalaciones gasísticas y petrolíferas.
- Centrales nucleares.
- Industrias vinculadas al tratamiento de papel y textil.
- Instalaciones de telefonía y telecomunicaciones en general.
- Aeropuertos, en torres de control.
- Ámbito sanitario, incluso en lugares donde existen maquinas tipo rayos etc.
- Acuarios.
- Muelles.
- Puentes de todo tipo.
- Pilotes.
- Edificación, refuerzo estructural de pilares.

- Postes de alumbrado de hormigón.
- Refuerzo en Conducciones.
- Instalaciones subterráneas.
- Estructuras sujetas agentes corrosivos.
- Etc.

Este sistema de refuerzo puede ser muy usado y en muy diferentes ámbitos pero donde se utiliza con frecuencia en el ámbito de la edificación y puentes. Es natural que casi todos los elementos estructurales de estos campos toleren un refuerzo en; pilares o pilas, forjados o vigas etc (Schwegler, 1994). Por lo tanto, la amplitud de variaciones para el uso de tejidos de fibra de carbono, barras, o laminados aumenta considerablemente.

En la figura nº2-11, observaremos el uso de la fibra de carbono por zonas de aplicación donde se puede ver la gran variedad de usos que dispone esta técnica que sin duda es muy recurrente y efectiva. También, se puede ver la forma en la que se puede aplicar.

Figura nº 2-11. Elementos fundamentales que puedes ser reforzados

El listado de elementos de uso es amplio pero siendo más concretos en la clasificación, y atendiendo a la parte resistente o esfuerzo en las acciones podríamos tener tres tipologías de refuerzos, siendo estas:

- Refuerzo por confinamiento.
- Refuerzo a flexión.
- Refuerzo a cortante.

Existen otros tipos de refuerzos, y que históricamente siempre preocupan por su impacto como son los refuerzos sísmicos debidos a terremotos. En estos casos esos refuerzos llevan aplicación de los tres anteriores mezclados siendo confinamiento, flexión, y cortante (Karbhari, V. and Gao, Y. , 1987). Un ejemplo muy típico donde se suelen emplear es para rodear las grandes pilas de los puentes (Wang Yung-Chih and Hsu K. , 2007).

En la figura nº2-12 vinculada a pilares reforzados con tejidos de fibra de carbono en una edificación mediante un confinamiento en el hormigón, resulta disponer de una resistencia a compresión magnífica donde su capacidad de carga podría hasta duplicarse y su deformación pudiera llegar a ser cuatro veces más. Como se comentó anteriormente es muy útil el refuerzo para estructuras sobre todo en caso de protección antisísmica, de esta manera aumenta la ductilidad en esas condiciones.

Figura nº 2-12. Pilares reforzados con tejidos de fibra de carbono en una edificación.

Otras de las utilidades que dispone el refuerzo de tejido de fibra de carbono es para la resistencia a flexión de vigas, losas, muros y otros elementos estructurales. En estos casos la capacidad resistiva a flexión de los elementos reforzados y pretensados podrían llegar a aumentar en el entorno del 70%. Existe otra utilidad que esta vinculada a las cargas fuera de

plano como pudieran ser en muros de hormigón etc. Esta utilizad ayuda a mejorar las fuerzas del viento, presiones ejercidas del suelo y presiones de tanques. En la figura nº 2.13 podemos observar la imagen de un pilar confinado de puente con tejidos de fibra de carbono (Salaverría, J. H. et. al., 1999).

Figura nº 2-13 Pilas de un puente confinadas empleando tejidos de fibra de carbono.

También se pueden usar el refuerzo con fibra de carbono en aquellas zonas donde presumiblemente existan momentos negativos ya que en estos casos el refuerzo se podrá colocar en la parte superior obteniendo así un aumento de capacidad resistente en el elemento en cuestión. Es común el aumento de capacidad cortante en columnas y otros elementos de hormigón. De igual modo, en estos casos se podría aumentar su capacidad portante y comportamiento dúctil (XIAO, Y. and WU, H. , 2000). Se pueden aplicar de varias formas pero en estos casos su aplicación es de manera transversalmente de forma similar a las ligaduras o zunchos. En la Figura nº2-14 podemos observar un refuerzo de tejidos de fibra de carbono a cortante en una viga.

Figura nº2-14 Refuerzo de tejido de carbono a cortante en viga.

En la figura n°2-15, se puede también observar en las pilares un refuerzo de tejido de fibra de carbono para aumentar la capacidad cortante que nos servirá para aumentar su resistencia al viento o cargas sísmicas (Alarcón López, A. , 2002).

Figura n°2-15 Refuerzo de tejido de carbono a cortante en pilar.

Saliendo de las estructuras habituales también es común realizar trabajos especiales en otro tipo de estructuras de hormigón. Son trabajos más puntuales pero no por ello menos importantes ante las situaciones como refuerzo de tuberías, tanques o silos, bóvedas, túneles, chimeneas y obras de mampostería entre otros. En estos casos, se requieren estudios previos ya que en muchas ocasiones se tiene que realizar trabajos especiales en alturas o en condiciones poco favorables. En la figura n°2-16 existe un refuerzo de tejidos de fibra de carbono en chimenea, y en la figura n°2-17 un ejemplo de refuerzo de fibra de carbono en túneles.

Figura n° 2-16. Refuerzo tejidos de fibra de carbono de una chimenea.

Figura n° 2-17. Refuerzo tejidos de fibra de carbono en un túnel.

Otra de las aplicaciones en estos días que se están usando es en la restauración de edificios históricos aunque en estos casos la restauración entraña unas preparaciones con refuerzo de tejidos de fibra de carbono son los que están vinculados a patrimonio nacional y/o histórico como pueden ser las iglesias.

2.4 Comportamiento del hormigón. Estructuras

Por si solo la conducta del hormigón armado en relación a uno de sus elementos sometidos a carga esta suficientemente estudiado. Obviamente, en la situación del ámbito de la edificación un pilar en obra civil y/o un puente la cuestión es variante ya que aparecen acciones internas con una serie de esfuerzos tanto verticales como horizontales que intervienen y se conjugan para realizar mejor su tarea que no es otra que soportar mejor las cargas.

Los pilares de hormigón o soportes son conocidos con el nombre de pilas o columnas, son elementos que normalmente están dispensados de forma vertical, y los esfuerzos van de igual modo en esa dirección haciendo coincidir con la fuerza de la gravedad. Para uno de los autores importantes en esta materia dice así (Jiménez Montoya, P. et. al. , 2000) *“la misión principal de los soportes es canalizar las acciones que actúan sobre la estructura hacia la cimentación de la obra y, en último extremo, al terreno de cimentación, por lo que constituyen elementos de gran responsabilidad resistente”*.

Un ejemplo muy didáctico existen en nuestro día a día en la naturaleza son los propios árboles ya que un árbol esta formado por fibras que se alojan de manera longitudinal pero que por su propia naturaleza están adheridas, y que proporcionan un magnífico esfuerzo

horizontal. En este caso, el propio tronco está diseñado para soportar las cargas siendo su sección circular la que transmite esa carga al terreno. Por lo tanto, el árbol dada su constitución es capaz de soportar unos esfuerzos axiales pero además tiene la capacidad de poder soportar efectos tan decisivos como los de flexión. En la Figura nº2-18 observamos el diseño de un tronco en un entrono natural.

Figura nº2-18 Diseño de un tronco en un entrono natural con aplicación de fuerzas

Otros investigadores como el caso de (Dante Espeche, 2007) también nombra a Eduardo Torroja (Torroja Miret, E., 2007), el cual define al soporte como un elemento único en la construcción de todos los tiempos. En relación a Eduardo Torroja menciona: *“Su misión es la síntesis de toda la finalidad constructiva: Soportar. Palabra que, en nuestra lengua, tiene algo de conformidad y de humilde renuncia a vanos derechos que, cuando se acepta voluntariamente y en razón o ideal de servicio, alcanza los límites sublimes de las mejores virtudes. Soportar es aquí, resistir; y, por eso, la columna es emblema de fortaleza”*.

Otro de los investigados y autores de renombre como (Jiménez Montoya, P. et. al. , 2000) indicaron que en los pilares *“la sollicitación normal es la predominante, y sus distintas secciones transversales pueden estar sometidas a compresión simple, compresión compuesta o flexión compuesta”*.

Otra misión de los pilares será aguantar y resistir los esfuerzos cortantes y flexiones.

Entrando en la composición de una probeta de hormigón, el material resiste muy bien la compresión pero no es así en relación a la flexión. Por ejemplo, el elemento que resiste los esfuerzos de flexión es el propio acero de la armadura interna.

Se puede resumir de manera sencilla y breve ya que las solicitaciones a las que esta sometido un pilar, siendo estas por ejemplo la compresión simple, caso en el que el eje se sitúa de manera neutra y todas las fibras se quedan comprimidas.

Otra de las solicitaciones importantes son las flexión pura o compuesta, donde el eje neutro estará dentro de la sección como podremos observar en la Figura n°2-19 donde se hace referencia a las excentricidades. La recta compuesta por los puntos a-b en la línea que nos marcara las tensiones cero. Por el contrario, si esta línea estuviera fuera de la sección transversal la sección únicamente soportaría tensiones a compresión, este sería uno de los casos más comunes sobre pilares de hormigón armado.

Figura n° 2-19. Excentricidades definidas por la recta a-b.

Otro de los aspectos resistivos que debemos de trabajar en los pilares es cuando deseamos resistir esfuerzos cortantes. Las secciones de un pilar de hormigón armado puede tener muchas y variadas formas. En la Figura n°2-20 se muestran algunas de las formas de las secciones que más nos interesan.

Figura n° 2-20. Formas de secciones más usadas.

Unos de los autores más autorizados en estructuras (Jiménez Montoya, P. et. al. , 2000), manifiesta que las armaduras están dispuestas en el hormigón en dos grupos diferenciados por un lado las principales, y por otro las secundarias. En el caso de las principales se desglosarían en longitudinales y transversales. Es conveniente explicar la colocación de las armaduras en el caso de los soportes ya que las armaduras longitudinales engloban la principal, y suelen disponerse de manera vertical al perímetro de la sección. Sin embargo, la armadura transversal esta formada por cercos y también estribos. La Figura nº 2-21 representa una armado en secciones según tipología.

Figura nº 2-21. Representación de secciones tipo soportes con estribos y zunchados.

En el caso de las armaduras longitudinales son elementos que colaboran de manera conjunta con el hormigón para soportar y resistir la compresión que se genera, y también las posibles tracciones que se pueden generar tanto en flexión compuesta como en cortante. Entrando en la forma en la que se disponen los cercos y estribos comentaremos que su misión es mantener las armaduras longitudinales mientras se procede al hormigonado, pudieran llegar a ser armaduras secundarias como armaduras de montaje. También son capaces de evitar el efecto de pandeo.

Otra funcionalidad de los cercos es evitar pandeos entre armaduras longitudinales. También, son capaces de soportar los esfuerzos cortantes aunque también se debe indicar que es un efecto de poco calado en relación a los pilares. En este caso, el efecto puede incrementarse en aquellos soportes que disponen de una sección circular colocando un zuncho en forma de hélice, ya que se puede realizar la separación entre estribos como se indica en la figura nº2.-21. La recomendación es que las columnas sean circulares, y es precisamente por esta

circunstancia el empleo de piezas muy cortas sin posibilidades de pandeo. Esta circunstancia es muy aconsejable en zonas donde existe un alto grado de sismicidad.

Otro factor importante es el relacionado con las dimensiones de los soportes que según (Jiménez Montoya, P. et. al. , 2000) indica que las dimensiones más pequeñas deben estar en el entrono de 20-25 centímetros, siempre que sean en pilares tipo columna o prismáticos. Están prohibidos por norma española aquellos dimensionamientos menores a 25 centímetros (ancho).

2.5 Elementos sometidos a compresión. Deformaciones

Un fallo muy común en las columnas de hormigón armado es el pandeo. Estos elementos estructurales que están siendo sometidos a compresión porque para eso principalmente han sido diseñados, es posible que su rotura se produzca antes por pandeo que por la propia compresión, es por ello que, es un efecto del que tendremos que estar muy pendientes (De Diego Villalón and Arteaga Iriarte, 2007).

Es conocido que un soporte es esbelto si los radios de giro en la sección transversal son pequeños en su relación con su longitud. Por lo tanto, el grado de esbeltez se expresará en función de la relación en (l/r) , donde l será la longitud y r el propio radio de giro ($r = \sqrt{\frac{I}{A}}$) de la sección transversal. Para secciones circulares el valor que tiene la r es el prácticamente el mismo para cualquier eje diametral.

Por este razonamiento, es comprensible que un elemento o soporte de gran esbeltez sometido a carga axial rompa antes que un elemento o soporte menos esbelto pero que dispongan de la misma sección o geometría transversal. Un soporte poco esbelto siendo su relación (l/r) inferior a 10, y estando sometido a carga axial rompe con la expresión:

$$N_u = 0,85 f_{ck}A_c + f_{yd}A_s \quad [2.1]$$

En este caso todos los elementos intervinientes como el hormigón y acero están siendo sometidos a su máxima capacidad, y ceden simultáneamente por fluencia y aplastamiento. Sin embargo, si la (l/r) esta en el entorno de 100 es más que posible que el soporte rompa a una carga axial inferior a $0,5 N_u$. La rotura se produce por una flexión lateral del elemento.

En otros países con la cantidad de materiales existentes y sus prestaciones, por ejemplo, EE.UU han unificado diversos criterios de cálculo incluyendo los elementos estructurales esbeltos. La normativa a las que nos referimos entre otras es las ACI (American Concrete Institute) (ACI 440.2R-17 , 2008).

Integrando la formulación de la ecuación diferencial homogénea podemos llegar a calcular la carga crítica. Dicha carga crítica será resultante de la siguiente:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{N_u \cdot y}{E \cdot I} \quad [2.2]$$

$$y = C_1 \sin(kx) + C_2 \cos(kx) \quad [2.3]$$

$$N_{cri} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad [2.4]$$

El maestro Euler hace más de doscientos años desarrolló una formulación que podía calcular la rotura por el efecto de la esbeltez, siendo esta:

$$\left(\frac{P}{A}\right)_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} \quad [2.5]$$

El módulo de Young se representa por E_t . Esta expresión representa como un aumento del valor de la esbeltez $\left(\frac{kl}{r}\right)$ reduce de manera destacada la capacidad de carga del elemento estructural soporte. Por el contrario, la relación (K_l) representa la longitud del pandeo del propio soporte, admitiendo así una carga axil en equilibrio, además, la recta en forma sinusoidal representa un desplazamiento lateral en relación al eje longitudinal, en este caso, se representa un momento flector adicional a la carga axil. Esto motiva una reducción importante sobre la capacidad indicada con anterioridad. A continuación, en la Figura n°2-22 se representan unas gráficas representativas sobre longitudes reales en soportes de hormigón según lo que expuesto a lo largo de este punto.

Figura nº 2-22.

Los autores (Winter, G. and Nilson, A.H. , 1977) destacan afirmaciones tales como; “en los soportes arriostrados contra el desplazamiento lateral de los extremos o que forman parte de estructuras que presentan esta característica, la longitud efectiva k_l , esto es, la distancia entre los puntos de inflexión, está comprendida entre $l/2$ y l , dependiendo del grado de coacción de los extremos”. También estos autores manifestaron que “las longitudes efectivas de las columnas no arriostradas contra el desplazamiento lateral de los extremos, o que forman partes de estructuras traslacionales son siempre superiores a l , y tanto mayores cuanto menor es la coacción de los extremos”. “Por consiguiente, la carga de pandeo de una estructura intraslacional contra el desplazamiento lateral siempre es mucho menor que de la misma estructura trabajando como traslacional”.

2.6 Sistemas de refuerzo. Ejemplo de polímeros en estructuras

La existencia de fallos en una estructura de hormigón armado evidencian la visión de cambios principalmente en su aspecto, y pueden llegar a formar parte de la patología de la propia estructura (Molins Borrell C. and Serrá Martín, I., 2004). Lógicamente, existen problemáticas más preocupantes que otras. En consecuencia, podríamos tener problemas que afectan directamente a la seguridad estructural, afecciones a la durabilidad o simplemente a su aspecto externo. Sin embargo, existen otros fallos más difíciles de detectar, y que sin duda

deben ser vigilados como son la corrosión que sin duda ponen en riesgo la seguridad estructural.

Fijándonos en el aspecto exterior la aparición de una simple fisura podría dar lugar a una patología en los elementos estructurales de importancia. Esa fisura inicial puede desencadenar una serie de datos iniciales importantes como son la forma, el lugar de ubicación y la propia forma.

La ubicación del lugar y la forma son determinantes para realizar el primer análisis ya que puede detectarse la afección en la esbeltez del pilar o afectar al reparto de compresiones. En la Figura n°2-23 podemos observar unas fisuras en un pilar.

Figura n°2-23 Fisuras en un pilar de hormigón.

No es casualidad que las primeras grietas aparezcan en la parte superior del pilar o más bien en el tercio superior ya que es la zona más debilitada desde el punto de vista de resistencia, y además, dispone de la directriz paralela a la carga. Hay patologías controladas que según las fisuras pueden ser derivadas de un problema u otro. Por ejemplo, si la rotura se presta en la parte más elevada del pilar podemos entender que pudiera existir un problema de mala calidad en el hormigón, si por el contrario se presta la fisura por debajo de los forjados es posible que exista un problema en los estribos, tal y como se muestra en la Figura n°2-23.

Una de las fisuras donde saltan las alarmas por su peligrosidad son las que se producen en la parte central del pilar pudiendo producirse la rotura de manera rapidísima.

Diferenciación entre Reparación y Refuerzo

Otra de las cuestiones importantes es saber diferenciar adecuadamente entre **reparación y refuerzo**, son dos términos diferentes, y que procederemos a desarrollar. El autor (Dante Espeche, 2007) indicó; *“conceptualmente, una intervención de refuerzo produce un incremento de capacidad estructural (resistencia, ductilidad, rigidez, etc.), lo que se traduce implícitamente en la reutilización del elemento antiguo, para mejorar netamente sus prestaciones”*. Normalmente, el refuerzo puede darse cuando va asociado a los cambios que puede sufrir una estructura en relación a la misión que tiene la misma, es decir, un aumento de tráfico añadiendo un carril más a la zona etc, es decir, potenciar o aumentar su capacidad (González Valle, E., 1991).

Sin embargo, la reparación (Frangou et. al. , 1995) y (Pérez Valcárcel, J. , 2000) se presta cuando es necesario restablecer las condiciones de uso habituales y/o prolongar la vida útil de la misma. Teniendo en cuenta este criterio debemos señalar que un refuerzo tiene presente la capacidad del elemento a reforzar.

Según (Dante Espeche, 2007) destaca la diferencia entre ambos conceptos siendo; *“reforzar significa reutilizar la sección existente, para dotarla de mayor capacidad con un adecuado factor de seguridad; en cambio, reparar implica restaurar la capacidad original sin contar con la aportación del elemento intervenido”*.

Hay otro concepto que está indirectamente ligado a este proceso, y es la protección. No es objeto del presente documento pero conviene definirlo a modo aclaratorio, por lo tanto, la protección no mejora ningún tipo de prestación de la estructura lo que hace es ralentizar los posibles deterioros de la estructura.

Mostraremos una serie de representaciones donde se mostrarán de manera diferenciadora los conceptos de protección, refuerzo y reparación (figuras nº2-24, nº2-25 y nº2-26).

Figura nº 2-24. Resultado capacidad sobre protección en función del tiempo.

Figura nº 2-25. Resultado de la reparación en función del tiempo.

Figura nº 2-26. Resultado del refuerzo en función del tiempo.

Recomendaciones previas sobre la ejecución de un refuerzo

Existe un momento en el que se plantea la necesidad previa de ejecutar un refuerzo (Lima, L. J. , 2007). El refuerzo se puede emplear en cualquier momento de la vida útil de la estructura, pero existen dos momentos y/o causas donde realmente se puede emplear:

Fase de proyecto y ejecución de la estructura:

- Posibles errores de proyecto.
- Mala calidad de los materiales intervinientes (hormigones etc.)
- Mal proceso de construcción.

Vida de servicio de la estructura:

- El propio envejecimiento de los materiales.
- Refuerzo y rehabilitación con elevado riesgo sísmico.
- Posibles cambios de uso de la estructura.
- Adaptación a nuevas exigencias normativas.
- Por posibles accidentes como fuego y explosiones.

Lo más importante antes de intentar proyectar cualquier tipo de refuerzo sobre una estructura es realizar un análisis muy cuidadoso de cómo se encuentra el estado actual de la estructura, esa fase de visualización y análisis nos servirán para poder ver si el refuerzo es viable (Newman, K. and Newman, J.B. , 1969). Teniendo en cuenta las observaciones se debe estudiar y recopilar la documentación existente, ejecutar inspecciones de campo y revisión del estado de la estructura. En estos casos, es muy importante realizar la labor comparativa entre la documentación lograda y el estado de la propia estructura en ese momento, sobre todo a su nivel constructivo (Alcaraz Carrillo de Albornoz, V. , 2011). Se pueden hacer pruebas aplicando diferentes métodos buscando la mejor solución inicial. Empleando los pacómetros se podría comprobar el estado del armado y la geometría de los elementos usados. También, se dan los casos en que la falta de información previa resulta compleja llegando a ser impredecible para poder realizar una inspección adecuada.

Por otro lado, y teniendo en cuenta la evaluación por seguridad estructural, esta debería de realizarse teniendo presente las diversas maneras de ejecución, siendo: probabilística, semi-probabilística y determinista. También, es obligado tener presente el proceso de diseño del

estado límite de servicio (ELS) y el estado límite último (ELU), donde será el primero el que siempre impere.

2.7 Estudios de estructuras

Los estados de aquellos elementos que se pretenden reforzar y que son comprobables en obra condicionando su dimensionamiento, vendrán definidos de la siguiente manera:

- Características geométricas.
- Tener un esquema de las armaduras existentes.
- Estados de fisuración superficial.
- Construcción de la estructura (edad).
- Tipo de elemento que se pretende reforzar (losa, forjado, pilar, viga, etc.).

Un proyecto debe de contener una documentación conformada sobre la propia calidad de los materiales usados en la ejecución estructural del propio elemento, también los controles de calidad realizados durante la ejecución. Estos inicios relacionados con las comprobaciones del conocimiento básico sobre el propio estado del elemento. Con todo ello, se podrá realizar y considerar un tratamiento adecuado relacionado con la calidad en el momento de comenzar la ejecución del elemento.

El valor añadido que le damos en relación a las acciones queda definido por la situación del elemento dentro de la estructura, y los cambios de uso previstos que se irán evaluando esas acciones según normativa. Serán comprobados en obra todos los detalles que influyan en los esfuerzos. Se disponen de dos formas estratégicas donde se podrían englobar los refuerzos. Los podríamos categorizar, siendo estos:

Grupo I.: Estaríamos en el caso en el que el refuerzo no aumenta las dimensiones del propio elemento estructural. Aquí, el refuerzo físico no existe, sustituido por el cambio en el esquema global de la estructura, llegando incluso a reducir las propias solicitaciones sobre los pilares o vigas que se hayan visto afectados. Esta circunstancia se logra de una manera que consiste en reducir la carga muerta empleando un pretensado disponibles en los apoyos intermedios sobre los propios vanos.

Grupo II.: A diferencia del anterior grupo la capacidad se incrementa de manera mecánica del propio elemento, reforzándolo por medio de técnicas como el encamisado de perfiles metálicos, recrecimiento del elemento con hormigón armado o con los propios materiales compuestos adheridos al hormigón con resinas epoxídicas (Luizaga Patiño, A.M. , 2005). En la figura n°2-27 se observa dicha aplicación.

Figura n° 2-27. Tipología de esfuerzos I.

Figura n° 2-28. Tipología de esfuerzos II

A la vista de la documentación técnica (Teng, J. G. et. al., 2007) revisada podemos afirmar que los refuerzos pueden ser de carácter pasivo o activo. Todo ello dependerá del momento en el que el elemento estructural entre en carga. Este proceso se podrá lograr de dos maneras claras, por una lado, en la puesta en obra del considerado refuerzo o bien incrementando la carga necesaria al elemento reforzado (Maalej M, et. al. , 2001).

Consideramos refuerzos activos aquellos que se disponen justo en el momento de la puesta en obra. Lo normal para esta situación es buscar un estado neutro de tensiones sobre la estructura origen, este procedimiento se consigue de una manera muy clara empleando elementos auxiliares y/o artificiales de carga como pueden ser el apuntalamiento activo con gatos hidráulicos. En la figura n°2-28 se observa la aplicación de elementos auxiliares.

En el caso de los refuerzos activos están preparados especialmente en aquellas estructuras originales donde no se verifican los estados límites de servicio, es decir, siempre que el refuerzo tienda a recuperar deformaciones existentes o cuando el refuerzo aporta incremento de capacidad importante ante los estados límites últimos. Esta técnica no siempre se puede emplear por varias razones una de ellas es por los controles tan exigentes que requiere, y otra, por que es un sistema costoso.

Lógicamente, los refuerzos pasivos constituyen la segunda tipología. Entran en carga cuando colaboran desde el punto de vista resistente a partir de un determinado estado de tensiones sobre la estructura existente. No es necesario descargar la estructura original, también se reducen costes en relación a medios auxiliares etc. El refuerzo se moverá siempre que exista un incremento de carga que tenga que solicitar al elemento, en este caso, se incrementará la deformación. Como ejemplo práctico para valorar el refuerzo se puede observar (Alcaraz Carrillo de Albornoz, V. , 2011) donde se ejecutan dos tipos de refuerzo en vigas.

2.8 Refuerzo de estructuras

2.8.1 Recrecidos de hormigón

Los aumentos y/o recrecidos de hormigón era una práctica antigua y barata usada antiguamente pero con el gran inconveniente de que ese incremento de hormigón generaba una mayor distribución de espacio en las secciones donde se aplicaba, es decir, en este caso sección transversal (Júlio, E.S. et. al. , 2003). Es un proceso que no requiere de una gran especialización en la ejecución desde el punto de vista de la mano de obra. Por otro lado, este proceso no difiere de un elemento de nueva ejecución. Este procedimiento consiste en colocar armadura (refuerzo) pasivo en el entrono de la estructura que deseamos reforzar, aunque no debemos olvidar que la sección debe estar preparada para tal ejecución.

Por esta misma razón, y siempre que deseemos realizar una ejecución de refuerzo es de vital importancia proceder al saneado del hormigón que deseamos reforzar. En este caso, se eliminarán las zonas más deterioradas y que estén más dañadas. Así, se conseguirá dejar el hormigón en las mejores condiciones para su recrecido. Existen otras técnicas como el agua a presión o chorro de arena etc. Una vez realizado la tarea de limpieza y saneado se procederá a la colocación aplicando la técnica de confinamiento que en los próximos capítulos se explicará detenidamente (Cometec técnicas en hormigón, S.A.U., 2007). En la figura nº2-29 se observa dichas tareas.

Figura nº 2-29. Refuerzo de un pilar saneado y reforzado con FRP.

Lo normal en estos casos es que una vez que el hormigón fue saneado se le proporcione un vertido adecuado de hormigón mediante encofrados alrededor de su perímetro para posteriormente colocar el refuerzo (Herrero, J.E.; Martínez Martínez, R.; et. al., 2004) FRP. Normalmente, una vez realizado el recrecido de hormigón para poder realizar el refuerzo con fibra de carbono se tiene que adherir una resina epoxi que servirá para poder realizar el correcto proceso de confinamiento mediante la FRP. Si bien es cierto, la técnica del recrecido es poco empleada ya que requiere espesores mínimos entre 10 y 15 centímetros.

Estos problemas se solucionaron con una nueva técnica, y la incorporación de micro-hormigones. Disponen de una fluidez importante en estado fresco que permite entrar y rellenar espesores realmente pequeños, y que son de vital importancia que sean recubiertos. Destacan una serie de ventajas con este método como es la posibilidad de ahorro en la energía de vibración, mejora de acabados y mejores condiciones para los operarios que las ejecuta. En este caso, el espesor podría reducirse a 4 o 5 centímetros para colocar armadura y/o cualquier otro refuerzo que se considere. Lo más importante es que para que se puedan transmitir los esfuerzos entre la nueva camisa y el pilar antiguo, existirá un recubrimiento que permita una durabilidad adecuada.

Figura nº 2-30. Refuerzo de pilar ejecutado proyectando hormigón.

Tal y como hemos comentado la ejecución del recrecido se puede hacer con el hormigón proyectado. La gran ventaja que tiene este proceso es la posibilidad de poder atacar todo el elemento estructural de una sola vez. Se puede observar en la figura nº2-30 proceso de construcción de un pilar, desde su preparación superficial hasta la ejecución del hormigón proyectado. Esta tipología de hormigón proyectado disponen de unas características generales de micro-hormigón, por ser de pequeño tamaño los áridos, aproximadamente de 8 milímetros, que facilitan la ejecución del recrecido. Esta situación dispone de la ventaja de permitir espesores de camisa menores que con los que obtenemos con hormigón vertido, ya que no es conveniente proyectar espesores menores a 4 centímetros. Un detalle destacable es que la compactación se realiza con el efecto dinámico del impacto por lo que no sería necesario realizar un vibrado posterior. Lógicamente, es una técnica extremadamente sucia y ruidosa, y el personal operario debe estar protegido desde el punto de vista de seguridad.

Existe otra posibilidad de uso, y que también es relativamente frecuente siendo el hormigón inyectado. El inyectado se realiza mediante un sistema de válvulas en la parte inferior de los encofrados que son capaces de soportar grandes presiones, empleando también otra válvula en la parte superior que permite realizar purga de aire y dejar de salir el exceso de lechada.

Los refuerzos con hormigón armado presentan algunas ventajas como puede ser; menor coste y empleo de mano de obra mucho menos experimentada, además, es un método garantizado por los años siendo fiable. Existe una ventaja importante que es la alta resistencia al fuego y

otras acciones medioambientales que afectan a su durabilidad, como pueden ser; humedades, ácidos, radiación solar directa.

El mayor inconveniente de esta técnica es el crecimiento de las dimensiones del pilar que se refuerza. Esta situación influye en la disposición de espacios y áreas respecto al original. De igual modo, hay que tener en consideración los tiempos de curado que no deben ser inferiores a treinta días, es un tiempo adecuado para que pueda participar con total garantías (León González, J. Et al. , 2004).

2.8.2 Refuerzos encamisados y formas angulares

Históricamente estos refuerzos sobre diversos elementos de hormigón armado surgieron en la década de los años 60. Fue entonces cuando se comenzó a realizar las primeras pruebas a través de ensayos en elementos reforzados. Es una técnica admitida por los expertos ya que dispone de una muy buena flexibilidad, y junto con la técnica de recrecido del hormigón son muy extendidas (Karbhari, V. and Gao, Y. , 1987) y (León, J. and Espeche, A., 2013). A pesar de ello, estas técnicas disponen de una serie de inconvenientes muy significativos:

- Las chapas pesan muchísimo, lo cual plantea enormes problemas en su montaje directo, incluso con movilidad muy reducida.
- Este proceso está en contacto con el aire libre con lo cual existe un gran riesgo de corrosión en la superficie del propio acero en contacto con el adhesivo.
- La existencia y necesidad de juntas en las chapas debido en modo alguno a las dimensiones podrían llegar a debilitar algunas zonas del refuerzo.

El uso de los refuerzos de manera angular solo se usa para secciones que son rectangulares, es una cuestión de tipología de sección. En la cuestión de pilares rectangulares se ejecutan disponiendo de angulares de acero normalmente en las cuatro esquinas del pilar, y transversalmente se arriostran por medio de presillas soldadas, cables o incluso pretensado de tornillos. En la figura nº2-31 se observa dichas técnicas.

Figura nº 2-31. Refuerzo pilar con la técnica ángulos metálicos.

Normalmente, esta tipología de refuerzos suele usarse cuando los pilares están sometidos a compresión, flexión y/o cortante. Suele darse en elementos donde su capacidad resistente tiende a ser insuficiente. De igual modo, se disponen de angulares metálicos en las esquinas siendo soldados a través de unas presillas. En otras ocasiones es habitual ver una ménsula de apoyo en la parte superior del pilar formada por cuatro angulares rigilizados, siendo estos los que se encargan de distribuir las cargas. Pudiera darse la casuística de rellenar mediante resina epoxi y/o mortero el espacio existente entre pilar y acero, mejorando así considerablemente el método de refuerzo, de este modo se evitara un espacio de concentración de tensiones y un contacto más uniforme. En la figura nº2-32 se observa la concentración de tensiones.

Figura nº 2-32. Refuerzo de pilar con ángulos. Vista alzado con detalles.

Una de las mayores dificultades o complicación en el refuerzo consiste en que previamente a la ejecución, debe ser analizado adecuadamente la carga de entrada, y disponer de una buena resolución a la hora de conectar los nudos en la estructura original o inicial. Pudiera darse la casuística de que no existiera ese principio de conexión, en tal caso, debe existir una continuidad longitudinal hasta la propia cimentación colocando placas de asiento.

Existe la técnica de refuerzo teniendo en cuenta los encamisados metálicos, esta técnica consiste en envolver con una camisa de chapa bastante delgada y de acero en perímetro del propio pilar (González Valle, E., 1991). Se puede indicar que el refuerzo en secciones circulares sería perfecto.

Existen otras técnicas de relleno que consiste en el inyectado de mortero o lechada, incluso aunque la camisa tenga la misma forma del pilar. Este método singular de inyectado a presión de lechada produce un estado de tensión a tracción en la camisa, generando un confinamiento activo en su reacción contra pilar. Es habitual poder ejecutar con resina epoxi generar camisas pegadas. En la figura nº2-33 se observa el encamisado metálico.

Figura nº 2-33. Encamisado metálico en sección elíptica.

Por otro lado, los sistemas basados en refuerzo mediante el uso de los composite o láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono (FRP), basan su ejecución mediante el pegado

externo en una superficie de hormigón usando unos materiales con características mecánicas y con resistencia a tracción muy buena (Ladner, Weber. , 1981). Este proceso de refuerzo indica que los materiales compuestos actúan de una manera como si fueran armadura externa, realmente lo que hacen es unas funciones parecidas a las que puede realizar una armadura interna con acero.

A fecha de hoy existen diferentes tipologías de refuerzos como son de tejido, barras o laminados, y asignación de diversos procesos constructivos. Un ejemplo típico es que se describe a continuación en la figura nº2-34.

Figura nº 2-34. Ejecución confinamiento tejidos de fibra de carbono.

Antes de comenzar con el refuerzo lo más importante es preparar la estructura que será objeto estudio, como cualquier otra técnica esto se hace para no encontrar zonas en mal estado del elemento estructural, ya que esa falta de preparación podría afectar en su resultado. Posteriormente, se aplicará una capa de imprimación de resina, dicha capa tiene dos misiones una de ellas es impermeabilizar y otra mejorar las características del elemento estructural.

Una vez aplicado la capa de resina, viene la fase más sensible de todo el proceso y es el recubrimiento de toda la superficie externa del elemento estructural de hormigón que es el tejido de fibra de carbono, dicha aplicación se hará con rodillo para impregnar la tela y eliminar posibles burbujas de aire. En el caso de ser varias capas de tejido será necesario la imprimación de varias capas de resina entre capas de tejido. Para finalizar el proceso se aplica una última capa de resina. En algunas ocasiones es necesario mejorar la estética, en esos casos, se puede utilizar pinturas acrílicas como si fueran resinas epoxídicas. En otras

ocasiones, y siempre que se estime oportuno, se podrían emplear pinturas ignifugas capaces de resistir el fuego.

2.8.3 Confinamiento de un pilar usando tejidos de fibra de carbono

En el momento en que un pilar de hormigón armado es envuelto con tejidos de fibra de carbono sometándolo a compresión, lo que realmente está sucediendo es que el refuerzo está actuando por confinamiento. Por todo ello, se afirma que un elemento estructural estará confinado en el instante que existan fuerzas que sean perpendiculares en la dirección de la carga principal o axial, en cuyo caso se limitarán las deformaciones de la carga vertical que son producidas por el efecto de Poisson.

Existe un aumento de la ductilidad en los soportes más antiguos, por todo ello, la técnica de encamisado con materiales compuestos suele emplearse en zonas catastróficas o sísmicas, aunque en esos casos también podría emplearse la fibra de vidrio. El uso de tejidos de fibra de carbono es más conveniente en proporcionar al elemento estructural con el refuerzo una mayor resistencia al pilar. Es precisamente por ese motivo por el cual analizaremos brevemente como colapsa de manera vertical un elemento estructural. Normalmente, el inicio viene originado por un desprendimiento del recubrimiento, posteriormente, se producirá un alabeo hacia el exterior entre cercos, y así, se produciría el colapso de ese elemento estructural vertical. Sin embargo, lo que se pretende conseguir con el confinamiento del pilar es lo siguiente:

- No llevar a un colapso y/o estallido del propio recubrimiento.
- Ejecutar un soporte lateral que aporte a la estructura en su esfuerzo longitudinal.
- Importante, aumentar la capacidad y resistencia a la deformación del hormigón.

El confinamiento incita a producir tensiones de compresión con un estado triaxial, originando una gran ventaja incrementando la compresión axial del pilar. La tesis objeto a estudio emplea envoltura de tejidos de fibra de carbono y resina epoxídica, además, entra directamente en funcionamiento ya que se le somete a una carga de tensión inicial a la fibra. A lo largo de los siguientes capítulos explicaremos con más detalle todo este proceso (Perera, R. , 2007).

Es necesario realizar la diferenciación entre confinamiento activo donde las tensiones vienen de las acciones exteriores, y el confinamiento pasivo, si las tensiones se producen por la

existencia de una envoltura transversalmente al propio hormigón comprimido tal y como se observa en la figura nº2-35.

Figura nº 2-35. Tensiones del refuerzo vinculantes en la sección y núcleo.

Con el sistema de confinamiento de tejidos de fibra de carbono se pretende conseguir un aumento de resistencia de la sección antigua. Por todo ello, el incremento de resistencia en compresión es acertado siempre que nos encontremos en elementos estructurales que no hayan superado el nivel de carga axial de servicio. Esta reacción es así ya que si aumenta la compresión en el elemento estructural o pilar original, la posibilidad de aumentar la resistencia del hormigón disminuiría. Es frecuente que los refuerzos de pilares suelen ser donde el pilar está soportando unas cargas dentro de su nivel de servicio, es decir, esas cargas no deben estar soportando una sobrecarga elevada sobre la calcula en proyecto inicial.

El comportamiento estructural de un elemento sometido a confinamiento se basa en limitar la deformación del área trasversal (ΔA) lo que repercute en un incremento de capacidad de carga vertical, si el incremento de sección transversal tiende a cero, entonces “N” tiende a infinito. La expresión usada sería:

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{N}{\Delta A} = \infty \quad [2.6]$$

Donde: N : carga
 A : área (sección)

Se puede afirmar que un aumento de resistencia no en la zona de mejora de la composición del material original, sino que lo que se pretende es una mejora en la lentitud de la pérdida del elemento estructural por completo, evitando y frenando por ejemplo; la micro-fisuración del hormigón o la pérdida de adherencia. Por todo ello, esta mejora dará como resultado una mejora en la presión lateral del refuerzo exterior

Figura n° 2-36. Tensiones del refuerzo interactuando en la sección.

En la figura n° 2-36, queda representado la presión lateral uniforme ejercida en el núcleo por el refuerzo sobre la probeta de hormigón (WU, Y. and WEI, Y. , 2015). De igual modo, empleando el tejido de fibra de carbono consideraremos que el propio refuerzo cubre sobradamente longitudinalmente la zona axil del elemento estructural pilar, ya que los tejidos de fibra de carbono siempre van perpendicular a la propia generatriz del pilar. Teniendo en cuenta que el hormigón esta comprimido y soporta la carga axial sobre el mismo dicha carga se entiende centrada, se generará entonces un refuerzo de fibra de carbono dando como resultado una uniformidad en su distribución de tracción. Es importante recalcar que los materiales compuestos en este caso tejidos de fibra de carbono y resina epoxi están especialmente fabricados para soportar tracciones, y además, trabajar en sentido circular.

Todos los procesos relacionados con uso de materiales compuestos han ido evolucionado a lo largo del tiempo. Inicialmente, los primeros estudios relacionados con el confinamiento de elementos con tejidos de fibra de carbono se realizaron empleando una bibliografía vinculada al hormigón confinado con camisas de acero. Con los años, y con estudios muy concretos, se comprobó que su aplicación directa no es del todo acertada, ya que se debe de tener en cuenta que la deformación en $\varepsilon = 0,002$ el acero plastifica, mientras que los tejidos de fibra de carbono permanecen elásticos de una forma muy lineal hasta rotura. Los estudios arrojan que la deformación de rotura de los tejidos de fibra de carbono superan a los del acero.

Por lo tanto, en el caso del acero su confinamiento alcanza una tensión máxima axial de dos por mil. En ese punto, encontraríamos una plataforma de fluencia donde no existiría aumento alguno principalmente debido a la plasticidad del acero. Por lo tanto, dicho método proporciona una enorme ductilidad al pilar. Uno de los parámetros más importantes en esta tipología de refuerzos es la ductilidad en elementos estructurales.

2.9 Análisis y comportamiento de modelos confinados con CFPR (cilíndrico)

Después de realizar un duro trabajo de recopilación bibliográfica podemos afirmar que entre todos los modelos teóricos de confinamiento relacionados con este amplio tema podemos destacar una serie de autores e investigadores muy destacados. Dichos investigadores son entre otros; (F. Richart et. al. , 1928), (Mander, J.B. , 1988), (Marijn R. Spoelstra , 1999), (Teng, J.G , 2001), (Teng J. G. et. al. , 2009), (A. Parvin and W. Wang, 2002), (Pierre Rochette and Pierre Labossière, 2000). A continuación, se ampliará profundizando más aún en los diversos investigadores incluso añadiendo otros.

En las últimas dos décadas se han ido desarrollando diversos modelos que han sido propuestos por diferentes investigadores para poder representar el comportamiento tensión deformación en pilares y/o columnas de hormigón siendo éstas confinadas mediante FRP, y siendo sometidas a una compresión simple en diversas tipologías de secciones siendo la más frecuente la circular y algo menos frecuente en las cuadradas.

Todos los modelos se clasifican en dos categorías principales; por un lado tendríamos los modelos de diseño, cuya resistencia a compresión axial, la deformación axial última y el comportamiento tensión-deformación se determinan empleando formulación matemática de manera cerrada, siendo obtenidas con datos experimentales por investigadores tales como; (Frangou et. al. , 1995); (F. Richart et. al. , 1928); (Y. H. ChaiM. and J. N. Priestley F., 1994); (Youssef, 2007). Por otro lado, los llamados modelos de análisis, permitiendo pronosticar diagramas tensión–deformación empleando procesos numéricos iterativos (Teng, J.G , 2001); (Spoelstra, M. and Monti, G., 1999); (Fam, A. Z. and Rizkalla, S.H., 2001); Chun y Park 2002; (Matthys, S. et. al., 2005); (Binici, B., 2005); (Teng J. G. et. al. , 2009); (Teng, J.G , 2001).

Normalmente, lo modelos de análisis suelen tener una mejor capacidad de predicción de que son los modelos de diseño, tenido una cercanía mucho más racional en el desarrollo para un modelo de diseño que este basado específicamente en un puro análisis matemático. Estos investigadores (J.G. Teng. et. al. , 2009) publicaron una compilación de modelos de análisis. Existen otros investigadores que han realizado estudios en relación a los refuerzos en pilares y/o columnas de hormigón armado en diversos tipos de sección tanto circulares como rectangulares. Dichos investigadores fueron; (Demers, M. and Neale, K. W. , 1999), (Karbhari, V. and Gao, Y. , 1987), (Chaallal et. al. , 2000) y (Chaallal et. al. , 2003), (Wang,

Y.C. and Restrepo, J.I., 2001), (Youssef, 2007), (Harries, K. A. and Kharell, G. , 2002) y (Harries, K. A. and Carey, S.A. , 2003), (Matthys, S. et. al., 2005).

Aún a día de hoy muchas de estas investigadores se han quedado sin finalizar debido a los altos costes, y a disponer de equipos de ensayo especializados y de muy alto rendimiento y sofisticación. En consecuencia, estas dificultades han provocado que la mayoría de los modelos dispongan de ciertas incertidumbres relativas a los elementos estructurales que han sido sometidos a ensayo. Dichas incertidumbres e imprecisiones podrían categorizarse en los siguientes aspectos:

- Las proporciones entre las propias dimensiones de la sección.
- Posible inestabilidad de la propia armadura longitudinal.
- Comportamiento no lineal de materiales.
- La contribución de la armadura transversal.

En este apartado de la presente tesis se pondrá de manifiesto modelos de análisis y diseño por parte de investigadores dedicados a los efectos del confinamiento, y las variables que lo producen.

2.10 Modelos de confinamiento

2.10.1 Modelo F. Richart et. al.

Uno de los investigadores más antiguos en el estudio del confinamiento fue (F. Richart et. al. , 1928), descubrió que tanto la resistencia como la deformación longitudinal del hormigón confinado por una determinada presión hidrostática pueden indicarse de la siguiente forma matemática:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad [2.7]$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} ((1 + K_2 (f_l / f'_{co})) \quad [2.8]$$

donde f'_{cc} y ε_{cc} sería la tensión máxima y la correspondiente deformación del propio que esta siendo sometido hormigón a una presión uniforme de confinamiento, f_l , f'_{co} , y ε_{co} corresponde a la tensión máxima con deformación del hormigón no confinado.

Las expresiones representadas nos proporcionan la base de los modelos de diseño, y posteriormente fueron propuestos por otros investigadores. Esta formulación planteada por (F. Richart et. al. , 1928) son de aplicación directa en pilares de sección circular, cuya tensión de confinamiento proporcionada por FRP, se podría asumir prácticamente uniforme sobre la sección, como sería en el caso de la presión hidrostática.

Es el propio (F. Richart et. al. , 1928) quien para poder obtener la una presión real de confinamiento que sea proporcionada por FRP es referido al diagrama de cuerpo libre y/o rígido de la sección transversal (figura nº2-35), estando sometidas a una presión uniforme f_l , y lo que es aún más relevante que las fuerzas que han sido encontradas en las condiciones de límite del FRP. Por todo ello, afirmó que entre el área confinada y el área total se daría un coeficiente de confinamiento directamente vinculado a la sección del propio hormigón K_e .

En consecuencia, teniendo en cuenta determinada formulación parabólica además de la representada, y teniendo en cuenta el coeficiente de confinamiento K_e y la propio tensión deformación f_l debido al uso de la propio FRP se podría calcular de la siguiente forma:

$$K_e = ((A_c - A_{ie}) / (A_c)) \quad [2.9]$$

$$f' = K_e f_l \quad [2.10]$$

2.10.2 Modelo Mander J.B et al.

Durante muchos años algunos investigadores entre los que destaca (Mander, J.B. et. al. , 1988) fueron trabajando y desollando modelos de comportamiento para relacionados con tensión deformación en pilares de hormigón confinados con camisa de acero, en estos casos aguantando unas cargas de compresión uniaxial. Este investigador contribuyó con el confinamiento mediante estribos de acero, y contribuye sobremano a muchas investigaciones sucesivas modelos de confinamiento por FRP.

También, en estos casos la sección del propio hormigón debería de tener cualquier tipología de acero para que éste confinase. Esta topología de experimentación demostró que el confinamiento de un núcleo de hormigón mediante un refuerzo alrededor de toda la generatriz del pilar proporcionaba un aumento muy significativo de la capacidad resistente, y lo que es más importante aún la ductilidad del propio pilar confinado.

La ecuación fundamental y el desarrollo esta basada a partir del refuerzo de acero, y no de tejido de fibra de carbono. Es de esperar que cada uno de los materiales que se emplean dispondrán de un comportamiento diferente al confinar el hormigón. En la finalización de este proceso matemático se explicará la aplicación más adecuada y correcta con los materiales de tejidos de fibra de carbono.

Se explicará en el modelo de Mander, según figura nº 2-37 diagrama de (Mander, J.B. et. al. , 1988), expresa una comparativa en la evolutiva de una curva de tensión deformación axial del propio hormigón sin producirse el confinamiento y al producirse el confinamiento del pilar con camisa de acero. Se observa que la fragmentación del hormigón se produce a un deformación del dos por mil, en tanto en cuanto el acero de igual modo plastifica más o menos a esa misma deformación, mientras tanto, el pilar tiene capacidad para poder seguir con un incremento tensional. Se tiene que tener en cuenta que llegados al punto de fluencia de capacidad de carga se disminuye, hasta un punto de rotura que será aproximadamente en un diez por mil, es decir, un aumento considerablemente importante.

Figura nº 2-37. Modelo Mander J. B et al.

En el momento que el acero llega a plastificar genera un descanso en su capacidad (Mander, J.B. et. al. , 1988) lo que plantea es que se desarrolla la evolución de la curva tensión deformación definida por uno de los puntos genéricos siendo este punto el definido por (f_c, ϵ_c) , por lo tanto, se utiliza el valor de la tensión máxima de la compresión junto a la deformación más adecuada y correspondiente.

$$f_c = \frac{f_{cc} * X * r}{r - 1 + X^r} \quad [2.11]$$

Sabiendo que: $X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} f_{cc} =$ tensión máxima de confinamiento.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} [1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right)] \quad [2.12]$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[-2,54 + 2,54 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} \right] \quad [2.13]$$

En base a estas ecuaciones y expresiones matemáticas es posible seguir la evolución del punto determinado (f_c, ε_c) mediante iteraciones.

2.10.3 Diversos modelo teóricos

Tal y como comentamos anteriormente lo que sucede con el acero no ocurre con los confinamientos de tejido de fibra de carbono, ya que una vez superada la propia deformación máxima del hormigón sin confinar (f_{co}) en la curva de las deformaciones axiales del propio hormigón confinado se sigue comportándose de forma muy lineal y creciente hasta el momento de rotura, tal y como sucede al incrementarse la tensión de confinamiento de la figura nº 2-38 de deformaciones y tensiones axiales.

Esto se debe a que los tejidos de fibra de carbono en su comportamiento lineal pueden llegar aumentar las deformaciones transversales del propio hormigón, y en consecuencia, aumentar sus tensiones de tracción.

Figura nº 2 38. Comportamiento bilineal pilar reforzado FRP tensión-deformación

Destacar que las investigaciones realizadas sobre este tema han indicado que la resistencia última del hormigón confinado está directamente vinculada a la deformación del compuesto de fibra de carbono en su rotura. Está demostrado y ensayado de manera experimental que esto ocurre en el momento que hay deformaciones menores que las obtenidas por los ensayos normalizados de resistencia a tracción sobre los tejidos de fibra de carbono impregnados con resina epoxídica.

También se debe tener en cuenta las observaciones realizadas por (L. Lam and J.G. Teng, 2003) en sus modelos del año 2003, fijándose en la presión ejercida por el refuerzo de confinamiento en el tejido de fibra de carbono impregnado con resina epoxídica en que solo alcanzaba un 50 y/o 60 % de la deformación de rotura. Es muy posible que esta reducción sea debida a las explicaciones que manifestó Dante Espeche. Dichas explicaciones fueron las siguientes:

- Una de las razones es el estado triaxial de las tensiones del propio refuerzo. La intervención adherente compuesta de los tejidos de fibra de carbono. En consecuencia, la existencia de una cesión de tensiones en la dirección longitudinal del propio elemento estructural.
- Importante disponer de una calidad de ejecución adecuada evitando poros e imperfecciones durante la ejecución de colocación del propio refuerzo.

- La capacidad de colocar varias capas de refuerzo genera un efecto de escala.
- El propio efecto de la forma curva.

El proceso y técnicas de confinamiento en probetas de hormigón tanto su diseño como su aplicación es óptimo. En edificación, se llamarían columnas aunque también se pueden llamar pilas en puentes. Esta técnica está muy experimentada en secciones circulares, y sus resultados son extraordinarios pero a medida que la sección empieza a diferir de ser circular nos encontramos con que la técnica pierde eficiencia.

A continuación, enunciamos algunos modelos matemáticos importantes en este proceso, siendo estos:

MODELO (Pilakoutas, K. AND Mortazavi, A. A., 1997)

$$f_{cc} = f_{co}(1,125 + 2,5 * \frac{f_l}{f_{co}}) \text{ si } 2 \frac{f_l}{f_{co}} \geq 0,1 \quad [2.14]$$

$$f_{cc} = f_{co}(1 + 5 * \frac{f_l}{f_{co}}) \text{ si } 2 \frac{f_l}{f_{co}} \leq 0,1 \quad [2.15]$$

MODELO (Toutanji, H. A., 1999)

$$f_{cc} = f_{co}[1 + 3,5 * (\frac{f_l}{f_{co}})^{0,85}] \quad [2.16]$$

MODELO (Spoelstra, M. and Monti, G., 1999)

$$f_{cc} = f_{co}[-1,254 + 1,254 \sqrt{1 + 7,94 * \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 * \frac{f_l}{f_{co}}] \quad [2.17]$$

MODELO (Spoelstra, M. and Monti, G., 1999)

$$f_{cc} = f_{co}[1 + 3,5 * (\rho_k - 0,01)\rho_e] \quad [2.18]$$

Interviene casualmente tres relaciones entre las diferentes variables como son; la relación de confinamiento $\frac{f_l}{f_{co}}$, relación de la rigidez de confinamiento ρ_k , y la relación de deformación ρ_e .

Las expresiones matemáticas de estas tres relaciones son las siguientes:

$$\frac{f_l}{f_{co}} = \frac{2 * E_{F.C.} * t * \varepsilon_{h \text{ rot}}}{f_{co} * D} \quad [2.19]$$

$$\rho_k = \frac{2 * E_{F.C.} * t}{\left(\frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}}\right) * D} \quad [2.20]$$

$$\rho_e = \frac{\varepsilon_{h \text{ rot}}}{\varepsilon_{co}} \quad [2.21]$$

MODELO (Teng J. G. et. al. , 2009)

$$f_{cc} = f_{co} [1 + 3,5 * (\rho_k - 0,01) \rho_e] \quad \frac{f_l}{f_{co}} = \frac{E_{CFRP} * t * \varepsilon_{h \text{ rot}}}{f_{co} * R} \quad [2.22]$$

$$\rho_k = \frac{E_{CFRP} * t}{\left(f_{co} / \varepsilon_{co}\right) * R} \quad \rho_e = \frac{\varepsilon_{h \text{ rot}}}{\varepsilon_{co}} \quad [2.23]$$

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f_{co}} \varepsilon_c^2, & 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \\ f_{co} + E_2 \varepsilon_c, & \varepsilon_t \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{cc} \end{cases} \quad [2.24]$$

$$\text{con: } E_2 = \frac{2 f_l}{\varepsilon_{cc}} \quad [2.25]$$

CAPÍTULO 3

Planteamiento y metodología

3.1 Alcance

Un elemento estructural como es un pilar reforzado tiene un comportamiento con un alto grado experimental. Esta es la razón por la cual al intervenir materiales compuestos cada uno de esos materiales deben ser examinados de manera muy contundente siendo sometidos estos a ensayos muy intensos de compresión con carga axial. En nuestro caso, el estudio teórico estuvo relacionado con la teoría del confinamiento, y se ejecutó sobre probetas de hormigón de sección circular de tamaño reducido (en adelante, probetas de hormigón). Estos ensayos normalizados pueden realizarse incluyendo armadura o sin incluir dicha armadura en la propia composición de las probetas de hormigón.

En el presente estudio se decidió el no emplear armadura en las probetas de hormigón. Todos los materiales intervinientes deben ser caracterizados adecuadamente para obtener los mejores resultados experimentales, teniendo en cuenta todos procesos estadísticos necesarios.

Por todo ello, durante el comienzo del proceso el primer planteamiento inicial fue poder caracterizar todos los componentes de una probeta de hormigón, teniendo en cuenta tanto la caracterización mecánica del hormigón como de cualquier otro elemento que formará parte de los ensayos. Este proceso de caracterización nos llevará al diseño de probetas de hormigón que serán ensayadas posteriormente en el proceso de experimentación.

También se realizará la caracterización de cada uno de los materiales que formarán parte del refuerzo de las probetas de hormigón. Al tratarse de materiales compuestos existe un adhesivo conocido como resina epoxi que va impregnada en el propio tejido. Este material es de vital importancia ya que es el elemento de unión entre la generatriz de la probeta de hormigón y el propio tejido de fibra de carbono. Con todo ello, se ejecutará un estudio en profundidad de todas las características mecánicas y reológicas.

Por otro lado, en este proceso de estudio de materiales también se prevé obtener todos los parámetros de los tejidos de fibra de carbono que están impregnados en la propia resina epoxi, ya que estos materiales disponen de un comportamiento mecánico que actúan de manera conjunta siendo muy diferentes al trabajar de manera individual, es decir, su comportamiento difiere actuando de manera individual o conjunta.

Lógicamente, serán estudiados de manera exhaustiva y especial los esfuerzos que actúan de manera conjunta como son el adhesivo y hormigón.

3.2. Generalidades sobre probetas de hormigón cilíndricas

Es el momento de entrar, plantear y establecer todo lo relacionado con el cálculo de elementos estructurales, en este caso, sobre probetas de hormigón.

La normativa (EHE-08, C.P. del Hormigón , 2011) indica que deben ser definidos todos los criterios de comportamiento y caracterización que se puedan esperar del propio elemento estructural. Una de las maneras de poder comprobar estas indicaciones de norma es con los términos de estados límites, siendo estos según la norma aquellos por los cuales el elemento estructural dejaría de cumplir sus funciones o incluso de satisfacer aquellas condiciones de proyecto para las que fueron realmente diseñadas y/o proyectadas. El proceso del sistema

consistiría en ser capaz de diseñar el estado limite que fuera más crítico, y ser capaces después de comprobar que no se alcanzan esos otros estados.

Un ejemplo muy característico en estos procesos lo recoge la normativa (ACI 440.2R-17 , 2008), la cual expresa el requisito básico de proyecto para el elemento estructural sometido a compresión, siendo su expresión matemática es la siguiente:

$$U \leq \phi x \text{ (Resistencia Nominal)} \quad [3.1]$$

$$U = \text{Resistencia Requerida} = \sum (\text{Factores} \times \text{Cargas de Servicio}) \quad [3.2]$$

$$\phi = \text{Factor de Reducciv} = n \text{ de Capacidad} \quad [3.3]$$

Normalmente, el código AC orienta la parte de la seguridad en la manera que acabamos de indicar empleando así algunos factores como carga y reducción de capacidad. Se tiene en cuenta que los factores de carga suelen ser superiores en la unidad, y obtienen unos valores diferentes según la tipología. Sin embargo, el factor de reducción de capacidad siendo sometidos a esfuerzo axial incluyendo estribos sería :

$$\phi = 0,70 \quad [3.4]$$

En el caso de elementos sometidos a carga axial el código ACI tiene considerado como expresión:

$$\text{Carga de rotura} = 0,85 f_{ck} A_c + f_s A_s \quad [3.5]$$

Frecuentemente, el hormigón tiende a romper por fragmentación o aplastamiento. Esta es una de las razones por las cuales al elemento estructural siendo éste la probeta de hormigón, debemos de ser capaces de proporcionarles una ductilidad adecuada pudiendo prolongar la deformación longitudinal. En el caso de disponer de una armadura longitudinal mínima la rotura sería de forma explosiva, y esto ocasionaría un grave peligro en caso de que fuera real, por ello, habría que tener muy presente el concepto de ductilidad adecuándola correctamente.

Un dato interesante que manifiesta la normativa (EHE-08, C.P. del Hormigón , 2011), artículo 42.2.2 indica; “*El hormigón confinado en compresión mejora sus condiciones de resistencia y ductilidad, aspecto este último muy importante para garantizar un comportamiento estructural*

que permita aprovechar, de forma óptima, toda la capacidad resistente adicional de un elemento hiperestático”.

En estos casos se debe de diferenciar entre los diferentes estados por un lado el estado límite último en cuyo caso corresponde a su máxima capacidad disponible portante, y el resto de estados sujetos a otros parámetros relacionados con su empleo habitual y más fundamentalmente a la durabilidad. Cuando se comenta sobre los últimos son aquellos que llegan cuando el elemento estructural pierde equilibrio, se deforma demasiado o incluso la propia rotura.

Se hablará de estados límites de durabilidad cuando encontramos daños, fisuras, vibraciones u otros de similares que puedan llegar a producir una degradación en la propia estructura. En estos casos para proceder y realizar los cálculos de este estado límite último se podrán aplicar diferentes planteamientos y/o teorías siendo las más conocidas plásticas, elásticas no lineales y las propias lineales, teniendo en cuenta las características y respuesta de los propios materiales que componen el elemento estructural.

Teniendo en cuenta la (EHE-08, C.P. del Hormigón , 2011) en un diseño con elementos estructurales con cargas axiles, siempre tendremos en cuenta varios coeficientes de seguridad siendo estos uno para las solicitaciones, y otro para la resistencia de los propios materiales.

Para esta tesis de entrada no se tendrán en consideración los mencionados coeficientes ya que son coeficientes que responden aspectos mas probabilísticos. Sin embargo, es preciso conocer las características de los propios materiales de los que están contruidos las propias probetas de hormigón para ensayo, acciones y solicitaciones que van a ser capaces de soportar, y en consecuencia los efectos que producen esos ensayos. Por lo tanto, es de vital importancia conocer muy bien las características en relación a la acción y respuesta del elemento estructural siendo en este caso la probeta de hormigón.

En consecuencia, las solicitaciones corresponden a las acciones de un elemento estructural (probetas de hormigón) pueden llegar a estar sometido. Se pueden indicar varias de las acciones que entran en juego siendo por ejemplo; el propio peso de los forjados trasmitiendo esas acciones a otros elementos. Algo parecido viene sucediendo cuando se habla de las cargas de servicio y/o los propios asientos de los pilares. No siempre es sencillo poder visualizar esos

problemas con la vista, sin embargo, si se pueden observar degradaciones, grandes vibraciones o incluso las temidas fisuraciones. Cualquier respuesta esta condicionada por las características mecánicas de los materiales de los que estén ejecutadas las probetas de hormigón.

Es trascendental trazar una geometría en las probetas de hormigón para poder realizar y plantear todas las acciones mecánicas a los diversos materiales. Es decir, lo que se pretende realizar en el estudio es que exista una relación coherente y racional entre diferentes parámetros, tales como; carga axial, hormigón, tensiones, momentos flectores y deformaciones.

Es muy importante tener claro como se produce y se aplica la acción ya que esa forma de actuar influirá de manera directa en el resultado de las probetas de hormigón. De igual modo, las tensiones y deformaciones serán diferentes dependiendo de la duración en el tiempo de la acción. En esta tesis dicha fase no se considerará ya que estamos en un proceso de experimentación, y únicamente nos ceñiremos a los procedimientos y velocidades de carga recomendados para la ejecución de ensayos con las precauciones idóneas de los laboratorios.

Definiremos la acción que puede llegar a soportar un pilar antes de que colapse como la capacidad resistente de un elemento estructural probeta de hormigón. En consecuencia, si comparáramos esa capacidad resistente con las condiciones de servicio el resultado sería, conceptualmente, obtener un factor de seguridad de vital importancia. Los ensayos de laboratorio nos ayudaran a dilucidar aquellos valores máximos teniendo en cuenta la deformación o si se debe de tener en cuenta estados de fisuración, aunque todo esta situación esta directamente relacionada. En consecuencia, la obtención de este parámetro de seguridad nos ayudará a poder plantearnos de manera real si nuestras hipótesis son adecuadas y reales.

Este proceso no es sencillo ya que existen muchas variables y condiciones que debemos de presuponer. Una de las mayores dificultades es el factor probabilístico de todas las acciones como pudieran ser las resistentes. Esta circunstancia de tener algunas solicitaciones aleatorias y posibles resistencias pueden desencadenar valores superiores al de resistencia, y cuya probabilidad sea fallida. Otra de las cuestiones que sí sabemos con seguridad es que podríamos relacionar las deformaciones axiles con valor dos por mil, ya que sabemos que todo valor que supere ese punto se convierte en un factor de seguridad en términos de ductilidad.

Bajo ningún concepto se debe de confundir el criterio seleccionado para el dimensionamiento con los llamados estados límites los cuales permiten llegar a criterios más probabilísticos. El objetivo alcanzar es que las características acción respuesta estén comprendidas dentro de unos valores que se puedan admitir como admisibles. Todo ello sirve para comprender que el elemento estructural probeta de hormigón no es útil en el momento que llega al estado límite por el cual fue diseñada y proyectada en proyecto.

Un elemento estructural como es una probeta de hormigón que esta siendo sometido a carga axial disponen de un comportamiento mecánico que va pasando por diversos periodos hasta alcanzar su rotura.

Analizando el comportamiento de la probeta de hormigón en los diversos periodos y/o etapas se puede afirmar que un pilar es elástico cuando su deformación esta cercana a $\epsilon = 0.0005$, donde se puede indicar que estaríamos alrededor de un 50% de la carga. Pasando al segundo periodo, la carga en su capacidad va ligeramente decreciendo, y esto es debido exclusivamente a la propia plasticidad del hormigón provocando un incremento en la deformación axial (ϵ), y cuya curva dispone de una forma más pronunciada hacia lo parabólico. En ese punto la deformación longitudinal asume una aceleración alta llegando al desprendimiento de aproximadamente $\epsilon = 0.002$.

El último periodo o etapa es cuando el hormigón fragmenta (en el caso de que existiera armadura longitudinal pandearía hacia el perímetro), y es entonces cuando el elemento estructural probeta de hormigón colapsa explosivamente y frágilmente. Por ejemplo, en el caso de que un pilar se le añadiese un refuerzo transversal tipo zuncho, en ese caso la rotura será mucho más dúctil, y lógicamente no admite más carga aunque si admitirá una mayor deformación antes de la rotura y/o colapso. Por el contrario, si el pilar es reforzado con cercos no cabe la posibilidad de que exista mayor deformación sino que en el momento que se fragmenta el hormigón se sucede el colapso.

3.3 Ductilidad mecánica

La ductilidad en una estructura es una característica fundamental. Es por ello que la seguridad de una estructura podría valorarse desde el punto de vista de la ductilidad. Se habla de ductilidad global aquella que engloba todos los elementos de la estructura pero no con todos los integrantes sino más bien como el elemento más crítico.

Por lo tanto, el elemento que da lugar a esa seguridad estructural o que define esa seguridad es la ductilidad, y la propia durabilidad de una estructura de hormigón. En la actualidad, se disponen de diversos métodos para valorar la ductilidad. Existen diferentes formas de cuantificar este proceso de la ductilidad, por ejemplo, cuando una estructura dispone de la capacidad de soportar un desplazamiento inelástico en ese caso se utilizaría la ductilidad global μ . Sin embargo, en el caso de ser plástico, se podrían desarrollar elementos que pueden cuantificar esa ductilidad desde el punto de vista de la propia curvatura.

Se podría admitir en los mecanismos de colapso de un elemento estructural el comportamiento de un pórtico que esta basado en el principio tipológico de mecanismo tipo “columna fuerte-viga débil” donde se emplea un ductilidad global de $\mu \leq 3$. Es un principio en que se debería de basar el colapso de estructuras con ductilidad completa. Será admitido este requerimiento para el diseño de pilares (en nuestro caso, probetas de hormigón) para estructuras de carácter completo. Sin embargo, es conveniente dejar claro que nos encontramos en una aproximación ya que las columnas elásticas nunca permanecen rectas y disponen de anchos infinitos. A pesar de ello, existe un alto grado específico asegurador suficiente en la capacidad de rotación inelástica.

En el caso de un elemento estructural como pudiera ser un pilar de hormigón según la calidad y/o la disponibilidad del acero transversal sabemos por ensayos que dicho elemento colapsaría con una deformación axial del $\varepsilon = 0.002$, o incluso para deformaciones mayores como en la figura nº 3-1 donde se observa una tendencia evolutiva de todas las deformaciones axiales teniendo en cuenta la tipología y calidad de las armaduras de manera transversal, tal y como manifestaron en su día (Winter, G. and Nilson, A.H. , 1977). En base a estas afirmaciones, se asevera que el punto inicial de referencia para definir el grado de ductilidad en una probeta de hormigón sería esa misma deformación $\varepsilon = 0.002$. Este punto inicial consolidado es importante ya que todo lo que signifique retrasar la rotura o colapso de la propia probeta de hormigón significará dotar de mayor ductilidad al propio elemento.

Figura n° 3-1. Curva de deformación y carga teniendo en cuenta armaduras transversales

Lógicamente, si se observan fisuras en un elemento estructural (pilar) tiene una doble lectura que debe llevar a la reflexión siendo ésta que es posible por un lado que podamos enfrentarnos a una rotura y/o colapso de manera inminente o por el contrario es posible que la armadura transversal empiece a entrar en juego, y por ello debemos actuar de inmediato.

3.4. Consideraciones y dimensionamiento de pilares

Antes de comenzar con la proyección y ejecución de las probetas de hormigón se realizó un estudio de viabilidad teniendo en cuenta los medios y materiales disponibles para poder realizar el estudio.

Con todo ello, se procedió a ejecutar probetas de hormigón (que simularan pilares de sección circular reducida empleados habitualmente en el sector de la edificación entre otros). En un primer estudio, se utilizó la teoría de pilar equivalente empleando la formulación que a continuación se observa en la figura n° 3-2.

$$N_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2} = \frac{\pi^2 EI}{(\alpha L)^2} \quad [3.6]$$

$$\text{Longitud equivalente} \quad L_0 = \alpha L \quad [3.7]$$

Figura n° 3-2. Pilares equivalentes con carga crítica

3.5. Descripción sobre el refuerzo en probetas de hormigón

En el momento que se formaron los lotes de probeta de hormigón, se procedió a la elección del refuerzo a emplear. En este caso se decidió usar tejidos de fibra de carbono impregnadas en resinas epoxídicas, empleando los tejidos en forma de chaqueta, es decir, envolviendo toda la longitud de la probeta de hormigón. Para este proceso se emplearon en el dimensionamiento las características indicadas por el fabricante. Se adjunta una figura n° 3-3 donde se observa la relación de las tensiones triaxiales muy significativas.

Figura n° 3-3. Comportamiento tensiones triaxiales

En el caso de una probeta de hormigón el dimensionamiento se basa principalmente en el encamisado de los materiales compuestos por los tejidos de fibra de carbono con la propia resina epoxídica. En consecuencia, debido al refuerzo de confinamiento la probeta de hormigón, el compuesto de hormigón esta expuesto a un sistema de estado de tensiones triaxiales. Para este estudio se puede indicar que la resistencia a compresión de los tejidos de fibra de carbono que confinan al hormigón pueden llegar a aumentar un máximo:

$$f_{cc} = f_{co} + 4 * n * f_x \quad [3.8]$$

f_{cc} : Resistencia compresión equivalente en pilar

n : número capas de refuerzo

f_x : Tensión horizontal confinamiento

$$f_x = \frac{f_{F.C.} * t_r}{r} \quad [3.9]$$

Donde r , radio base del pilar

No obstante, se deben de tomar una serie de recomendaciones y consideraciones para proceder a ejecutar un buen dimensionamiento, siendo las siguientes:

- Se procede a diseñar un refuerzo permitiendo una deformación unitaria axial $\epsilon = 0.006$.
- En el diseño de la fibra se permitirá una resistencia a tracción, siendo esta de:

$$f_{F.C.} = \frac{E*0,006}{1,5} \quad [3.10]$$

En este estudio el número de capas de tejido de fibra de carbono empleado fue de una capa de refuerzo a confinamiento pasivo para un lote de probetas de hormigón, y de dos capas de refuerzo a confinamiento pasivo para otro lote más de probetas de hormigón, respetando lógicamente los solapes establecido por norma de 200 milímetros. También se estudió, a través de un diseño único e innovador, otro lote más de probetas de hormigón aplicando una capa de refuerzo a modo de confinamiento activo. Éste último lote servirá para poder realizar las comparaciones idóneas entre lotes de refuerzo de una capa de probetas de hormigón tanto pasivo como activo, obteniendo un aumento significativo del módulo de elasticidad.

El dimensionamiento será aproximado, y todas las expresiones empleadas estarán en función de todos los parámetros que forman parte del proceso tales como; la tipología del hormigón, la longitud de la propia probeta de hormigón, las capacidades y resistencias mecánicas de los tejidos de fibra de carbono, la resina epoxi etc.

CAPÍTULO 4

Programación Experimental

4.1. Generalidades

El estudio que se está desarrollando en éste capítulo es una programación vinculada a la propia investigación experimental. Por lo tanto, engloba todo aquello que está relacionado con la descripción y ejecución de los ensayos con los que se pretende identificar y caracterizar todos los materiales intervinientes en el proceso del refuerzo de las probetas de hormigón mediante tejidos de fibra de carbono. Además, se estudiarán todos los ensayos realizados experimentalmente, y también todos aquellos que sirvieron para el modelo de probetas de hormigón en relación al proceso de rotura por carga.

De igual modo, en este capítulo se realizará la presentación de todos los medios empleados incluidos la instrumentación junto con la propia adquisición de los propios datos que dieron como resultado a lo largo del proceso. También, se presentarán todos los medios característicos de transmisión de cargas. Con todo ello, y siguiendo los procesos de adecuación se dejan varias líneas de investigación para futuros procesos.

La labor de caracterizar materiales y el empleo de equipos y medios, tanto en la preparación de ensayos han sido facilitados por cortesía del Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnico Superior de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, y por la empresa (Drizoro S.A.U., 2013). Dicha empresa es la encargada de comercializar muchos de los productos vinculados al refuerzo de tejidos de fibra de carbono. En consecuencia, todos los ensayos fueron realizados y categorizados con la adquisición de datos en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de construcción de la E.T.S.I.C de la U.P.M., la cual está perfectamente preparada para poder asumir una investigación experimental del calado de la presente.

En el desarrollo de este proceso de investigación experimental se seleccionó una tipología de tejidos de fibra de carbono con un elevado módulo de elasticidad compatible con la deformación del hormigón. La elección del tipo de fibra como se dijo anteriormente dependerá de otros factores como el tipo de carga y las condiciones medioambientales del entorno de la estructura. Con esta fibra se reforzará toda la longitud de la probeta de hormigón

Una de las técnicas empleadas para poder adherir los tejidos de fibra de carbono en el elemento estructural probeta de hormigón se llama “wet-lay-up”, donde la resina epoxídica empleada para pegar y/o encolar pasará a ser matriz del material compuesto. El desarrollo del proceso consiste principalmente en la adición de que un material sea resistente a esfuerzos de tracción, siendo la adhesión sobre aquellas superficies de una pieza (probeta de hormigón).

Este proceso se realiza para proceder a aumentar la capacidad resistente de la pieza y/o elemento, en este caso probetas de hormigón. También nos servirá para poder realizar una comparativa entre confinamiento pasivo con una capa de refuerzo y el confinamiento activo con una capa de refuerzo, de tal modo que se pueda obtener un aumento del módulo de elasticidad.

Existen diversas ventajas en la propia fabricación directa de un compuesto sobre el propio elemento estructural y/o soporte. La principal ventaja del proceso consiste en la anulación de tensiones, esto se evita ya que al moldear adecuadamente la superficie e impedir una interfaz de la propia adherencia entre tejido y superficie de hormigón. Es importante en este sentido procurar que la superficie este correctamente ejecutada siendo ésta uniforme, y que se pueda dar viabilidad al proceso de refuerzo con el tejido. Destacar que una de las partes más

importantes del proceso es el solapamiento en el tejido y/o más bien llamado anclaje transversal, ya que es aconsejable que no sea inferior a los 200 milímetros.

Antes de comenzar con la fabricación de probetas de hormigón y su estudio, se tuvieron que estudiar debidamente todos los materiales relacionados con el compuesto del refuerzo. Por otro lado, todas las características que serán ensayadas en relación a los materiales compuestos, y que influirán directamente en la funcionalidad y comportamiento mecánico de los elementos estructurales reforzados (probetas de hormigón) fueron:

- **Caracterización y resistencia mecánica del propio hormigón.** La resistencia característica a compresión para poder reforzar probetas de hormigón fue aproximadamente de $f_{ck} = 25 \frac{N}{mm^2}$. Este ha sido el dato empleado para poder planificar y diseñar con garantías la dosificación del hormigón a fabricar. El hormigón debe curarse adecuadamente en las cámaras especialmente diseñadas para posteriormente obtener las características mecánicas a través de los ensayos especialmente normalizados.
- **Caracterización mecánica tejidos de fibra de carbono.** Un nuevo material emergente en el mercado como material de refuerzo en el ámbito de la construcción han sido los tejidos de fibra de carbono. Este material tiene un comportamiento muy bueno de cara al refuerzo de materiales. Su composición esta realizada por una serie de fibras de carbono dispuestas longitudinalmente estando unidas de manera transversal a través de unos hilos de fibra de vidrio siendo estos los que aseguran su comportamiento en el momento de la aplicación. Las empresas especializadas los comercializan en rollos de 50 metros y 30 centímetros de ancho, y de 50 y 100 metros con anchos de 25, 33 y 50 centímetros en el caso de alta resistencia (HM), lo que permite una manipulación más sencilla y manejable. Es fundamental conocer sus características mecánicas para poder ser empleadas como refuerzo.

Una de las recomendaciones del fabricante es que la fibra de carbono es conductora de electricidad por lo que se deben de tomar las medidas oportunas para evitar que no entre en contacto directo con instalaciones eléctricas. Es recomendable que las piezas cortadas de hojas de fibras de carbono deben ser debidamente guardadas y ordenadas.

En su manipulación la recomendación más importante es evitar que se doblen y/o arruguen los trozos de fibra.

Este material fue entregado por una empresa que colabora con la E.T.S.I.C de la U.P.M en trabajos de investigación. El objetivo fundamental es conseguir determinar el comportamiento mecánico de los tejidos de fibra de carbono que están impregnados con la resina epoxi. En realidad lo que se busca es el comportamiento mecánico del propio conjunto, y lo que es capaz de resistir mientras esta éste compuesto adherido al hormigón.

- **Caracterización mecánica sobre el adhesivo epoxídico.** Como se fue explicando a lo largo del texto la transmisión de los esfuerzos desde el hormigón hacía el propio material de refuerzo se realiza a través del adhesivo. Las tensiones y deformaciones que entran en carga con el elemento reforzado, serán soportadas por el propio adhesivo sin llevarlo a su estado final de agotamiento. En consecuencia, la resina epoxídica siendo el adhesivo mantiene una labor fundamental en la unión de una probeta de hormigón con los materiales de refuerzo, siendo este material el elemento transmisor de tensiones y deformaciones diferentes de los materiales para probetas de hormigón reforzado. Las características mecánicas deben estar en consonancia con aquellos materiales que serán unidos siendo estos los tejidos de fibra de carbono y el propio hormigón.

El efecto de las sollicitaciones provocadas por las deformaciones, las variaciones producidas por la dilatación térmica o la propia fluencia del hormigón provocaran en la propia capa del adhesivo una nueva distribución de tensiones con relación a la inicial. Debido a la forma de trabajar de los refuerzos el adhesivo estará sometido a unas tensiones que van desde cero hasta una máximo que debe ser capaz de soportar sin problemas. El adhesivo debe disponer de unos valores fundamentales en relación al módulo de rigidez transversal, coeficiente dilatación térmica, resistencias a tracción, módulos de elasticidad, resistencias a cortante y tracción etc., siendo obligado un estudio muy intenso en relación a su formulación y que son diferentes a otras aplicaciones constructivas.

4.2 Modelos y análisis experimentales

Para proceder a un estudio adecuado del comportamiento de probetas de hormigón (sección circular, y sin ningún tipo de armaduras de acero) reforzadas con tejidos de fibra de carbono lo que se pretende es experimentar probetas de hormigón realizando una similitud de edificación normal doblemente empotrada por un forjado superior e inferior. En la tabla nº 4-1 se puede ver el resumen experimental del proceso.

Tabla nº 4-1. Resumen plan experimental.

Modelo Probetas Cilíndricas	Lotes	Dimensiones Milímetros	Tipo de Confinamiento	Refuerzo Tejido Fibra de Carbono	Nº Probetas
Cilíndricas	1	300 x 150	Ninguno	Sin Refuerzo	5
Cilíndricas	2	300 x 150	Pasivo	1 capa de refuerzo	5
Cilíndricas	3	300 x 150	Pasivo	2 capas refuerzo	5
Cilíndricas	4	300 x 150	Activo	1 capa de refuerzo	5

Se realizó un control estadístico decidiendo tomar muestras de lotes de 5 probetas. Este porcentaje permite valorar los resultado de una buena forma, y contrastar adecuadamente los resultados de manera probabilística. Las características de los diferentes materiales utilizados en su ejecución se emplearon entre otros la formulación siguiente:

- Media Geométrica:

$$\bar{x} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n} \quad [4.1]$$

- Desviación Típica:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad [4.2]$$

- Relación tensión/deformación:

Figura n° 4-1. Relación tensión/deformación

El empleo de la sección circular es más adecuado ya que está contrastado que los comportamientos son mejores en modelos reforzados con los materiales anteriormente mencionados. En la figura n°4-2 se observa probeta de hormigón reforzada con fibra junto a sus dimensiones.

Figura n° 4-2. Probeta de hormigón 300 x 150 mm. Plan de experimentación

Como objetivo principal se decide construir probetas de hormigón con un 1° lote sin refuerzo, un 2° lote con una capa de refuerzo con confinamiento pasivo, un 3° lote con dos capas de refuerzo confinamiento pasivo. Por último, se construye un 4° lote con una capa de refuerzo con confinamiento activo, donde dicho refuerzo actuará desde el primer instante. Éste último lote servirá para poder comprobar el aumento significativo del módulo de elasticidad

ejecutando comparación de lotes entre confinamiento pasivo con una capa de refuerzo, y el lote con una capa de refuerzo de confinamiento activo.

En total se construyen 20 probetas de hormigón. En la figura nº 4-2 se puede observar la probeta de hormigón. Todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la E.T.S.I.C de la U.P.M.

A la hora de experimentar las probetas de hormigón, se procedió a su rotura por compresión axial que determinarán un valor que se refiere al punto donde el hormigón fractura y rompe por compresión. Los resultados teóricos se identifican con dos puntos específicos que se refieren al recorrido final de la fase elástica del hormigón (comportamiento lineal), y el punto en el que el hormigón se fragmenta por compresión (comportamiento parabólico). En la figura nº4-3 se observa el esquema de aplicación de carga axial.

Figura nº4-3 Esquema de aplicación de carga axial

A continuación, según la figura nº4-4, se observan un conjunto de probetas de hormigón relacionadas con el lote 1 (probetas de hormigón sin refuerzo de tejido de fibra de carbono), siendo preparadas para ser ensayar.

Figura nº4-4. Probetas de hormigón y preparadas para ensayo

El proceso fundamentalmente consistió en ensayar los diferentes lotes de probetas de hormigón a ensayo de compresión para poder obtener una serie de resultados. El 1º lote sin refuerzo de ninguna clase serviría como patrón comparador con el resto de resultados de los demás lotes teniendo en cuenta los demás materiales. Por otro lado, el 2º lote de probetas de hormigón con una capa de refuerzo (confinamiento pasivo), y 3º lote son probetas de hormigón con dos capas de refuerzo, donde se les ha reforzado con tejidos de fibra de carbono, es decir, no se les incorporó ningún tipo de tensión a la fibra.

El refuerzo a confinamiento pasivo significa que hasta que la probeta de hormigón no empieza a colapsar los tejidos de fibra de carbono adheridos con resina epoxídica no entra en juego. El refuerzo pasivo es el que actúa ante los esfuerzos de tracción que recibe el hormigón debido a la carga axial, aumentando su capacidad portante.

Sin embargo, el lote 4 con refuerzo de fibra de carbono se dice confinamiento activo ya que se le incorpora una tensión inicial externa de 135 Newton. Esto quiere decir que en el momento que probeta de hormigón siente el esfuerzo a tracción entraría en funcionamiento reforzando esa situación los tejidos de fibra carbono impregnados, y cumpliendo la misión específica. En este caso, alargaríamos la ductilidad del proceso, y en consecuencia, aumentaríamos su módulo de elasticidad, siendo éste uno de los principales objetivos de la presente tesis. La conclusión inicial es, a pesar de que será explicado más adelante en siguientes capítulos, se conseguiría aumentar la capacidad de resistencia de las probetas de hormigón mucho más que si la probeta de hormigón no estuviera reforzada o si estuviera reforzada con tejidos de fibra de carbono con un confinamiento pasivo.

En relación a los lotes 2° y 3° sometidos a confinamiento pasivo serán explicados a continuación. La primera capa de resina fue aplicada en el 2° lote de probetas de hormigón a confinamiento pasivo ejecutándose de manera vertical sobre una mesa, y a su vez, sobre un tablón de madera, empleando el uso de una espátula directamente sobre la superficie de la probeta de hormigón. Una vez realizado este proceso, y estando aún fresca la resina se colocó la primera capa de refuerzo de tejido, tensándola y presionando de forma manual, empleando además un rodillo de manera que se pudieran eliminar las burbujas de aire. Este primer proceso de pegado se realizó observando que funcionaba el sistema con pruebas anteriormente realizadas para poder ejecutar con éxito el primer pegado del 2° lote. El proceso resultó ser satisfactorio.

En el caso del lote 3° donde se implantaron dos capas de tejido de fibra de carbono (confinamiento pasivo) se procedió de la misma forma que en el lote 2°. En este caso, y siguiendo la misma dinámica que en el lote 2°, se pusieron las probetas sobre una mesa, y a su vez sobre un tablón de madera para facilitar el giro. Se impregnó la primera capa de resina sobre la probeta, y aprovechando que aún estaba húmeda la resina se procedió a ir colocando el tejido de fibra. En esta ocasión la dificultad era aún mayor que en el lote n°2 ya que se impregnaría la doble capa de tejido de fibra de carbono donde se tuvo en cuenta el solapamiento mínimo de 20 centímetros. La labor fue compleja ya que se tuvo que ir intercalando el uso de una espátula y rodillo para evitar la aparición de burbujas de aire. El proceso finalizó con éxito, y se consiguieron ejecutar los lotes 2° y 3° de probetas de hormigón con confinamiento pasivo, siendo el lote 2° con una capa de tejido, y el lote 3° con dos capas de tejido.

Sin embargo, en el lote 4° correspondiente a una capa de refuerzo de tejidos de fibra de carbono por confinamiento activo, la forma de realizar la envoltura e imprimación fue a través de un diseño único e innovador que permitiera envolver y aplicar la resina expoxídica. El diseño para enrollar consistió en una estructura metálica de 1000 mm de alto, colocando dos tableros de madera tipo rail a la distancia idónea de 320 mm, dejando apenas dos centímetros de holgura para poder enrollar los tejidos de fibra de carbono cuyo ancho era de 300 mm. En la figura n° 4-5 se puede observar la estructura con una probeta de hormigón, y la forma de ir enrollando y realizando la imprimación con la resina epoxídica, donde se empleó un rodillo y brocha específica para evitar los posibles poros.

Figura nº 4- 5. Diseño de modelo estructural de envoltura e imprimación de tejido de fibra de carbono. Caso una capa de refuerzo pasivo

La preparación una vez encolada la primera parte fue dejarla reposar 48 horas. Pasado ese tiempo se pudo empezar el proceso de envoltura e imprimación en las probetas de hormigón. Una vez envuelta la primera capa se dejó preparado un solape de 200 milímetros según norma. Además, se dejó fraguar 48 horas, en la figura nº 4-6 se observa la manera de envolver y enrollar las probetas de hormigón. Al final de la envoltura se colocaron unos topes para evitar en retorno de la probeta de hormigón.

Figura nº 4-6. Proceso de envoltura e imprimación probetas de hormigón

Es un caso novedoso y único la forma de incorporar el confinamiento activo al lote 4 con una capa de refuerzo en las probetas de hormigón. Se puede observar en la figura nº 4-7 como se cuelgan a través de unas abrazaderas tres poleas de 4.5 kilogramos con un sumatorio de 13.5 kilogramos. El proceso consistió en envolver la probeta de hormigón despacio pero con la

diferencia de que se estaba tensando, es decir, transmitiendo con el adhesivo una tensión de 135 Newton a las probetas de hormigón. Se tuvo que dejar fraguar la resina epoxídica 48 horas para su proceso posterior, y continuar con los ensayos. Se estaba consiguiendo uno de los objetivos de la investigación que era plasmar un confinamiento activo desde el primer instante, y además, asentar las bases en los ensayos realizando la comparativa específica para conseguir otro de los objetivos fundamentales de la investigación que es conseguir un aumento del módulo de elasticidad.

Figura nº4-7. Aplicación confinamiento activo tensión de tres pesas de 135 Newton

En capítulos sucesivos se comentarán los resultados y evolución del proceso.

4.3 Instrumentación y proceso de ensayo

Para poder estudiar con garantías el comportamiento tensional de las probetas de hormigón, y determinar las propiedades mecánicas de un material, debemos conocer todos los esfuerzos y deformaciones que puede llegar a sufrir ese elemento en el momento que se ejercen cargas y/o acciones exteriores sobre el mismo. Por todo ello, es necesario preparar una zona del propio elemento donde se pueda colocar un elemento capaz para poder transformar esa magnitud física en una magnitud que proporcione un valor por el cual podamos realizar su valoración, y que lo normal en esta tipología de trabajos suele ser eléctrica. El transductor más usado en la transmisión de datos son las bandas extensométricas.

Las bandas extensométricas son elementos con una topología de carácter resistivo. El funcionamiento, y en consecuencia su forma de actuar consiste en realizar un cambio de

resistencia eléctrica que puede llegar a sufrir el hilo conductor en el momento de variar su longitud. Es por ello, que se podrá calcular y valorar la variación de longitud que puede llegar a experimentar la banda midiendo la variación de resistencia que pudiera presentar. Con todo ello, habrá una relación directa entre la deformación que sufrirá la banda y la propia variación de la resistencia eléctrica.

El funcionamiento consiste en relacionar la variación de resistencia y deformación, por poner un ejemplo; si cogiéramos un material cualquiera con una longitud inicial coherente con su diámetro, y lo deformáremos hasta una longitud “X”, suponiendo que ese material sea elástico, es decir, que recuperara todas sus deformaciones, la relación entre deformaciones longitudinales y transversales vendrán dadas por el llamado coeficiente de Poisson.

En consecuencia, todos los datos obtenidos durante los ensayos serán tratados para poder calcular fundamentalmente el estado y comportamiento de las probetas de hormigón diseñadas, y así poder determinar las conclusiones que se estimen oportunas en el proceso. En la figura nº4-8 se observan las bandas extensométricas.

Figura nº 4-8. Bandas extensométricas

CAPÍTULO 5

Fabricación y Refuerzo

5.1. Introducción

Una vez definido el plan experimental en éste capítulo vamos a proceder a la caracterización mecánica y fabricación de los materiales que componen las probetas de hormigón. La elaboración y construcción de dichas probetas de hormigón servirán para ejecutar todos los ensayos necesarios, y conseguir los objetivos inicialmente marcados.

Se detallará con sumo detalle el diseño y los procedimientos sobre el refuerzo, y se determinaran las características mecánicas de los tejidos de fibra de carbono junto con las resinas epoxídicas que se utilizaran en el proceso de impregnación. También se definirán los productos necesarios para la uniformidad de la superficie de contacto donde se ejecutará la imprimación.

Será ejecutada una fase específica para determinar la capacidad resistente del compuesto diseñado entre el tejido de fibra de carbono y resina epoxídica, ya que dicho compuesto será el que esté sometido a esfuerzos de tracción con la intención de que la propia probeta de hormigón pueda soportar una mayor carga de rotura. Además, fue diseñado un sistema para ejecutar los ensayos con los tejidos de fibra de carbono impregnados.

5.2. Materiales para la fabricación de probetas cilíndricas de hormigón

5.2.1. Materiales

A continuación, se desarrollará la caracterización de los materiales que componen las probetas de hormigón.

5.2.1.1 Cementos

Para la ejecución del hormigón se empleó cemento Portland mixto con topología CEM II/B-M (V-L) 32,5 R. El cemento dispone de composición nominal estando formada por 65-79% en clinker, 21-35% escoria alto horno, 5% por puzolana y 5% de caliza.

El cemento dispone de una densidad media de $3,02 \text{ kg/dm}^3$, con un tiempo de fraguado aproximado entre los 90 y 155 minutos para ensayos de 500 gramos de cemento y una cantidad de 160 ml de agua.

En la tabla nº5-4 se podrá observar la relación en función de la dosificación asignada.

5.2.1.2 Arena

En relación a los áridos se empleó una arena silíceo de río cuya densidad media fue de 2.62 kg/dm^3 , y con una equivalencia real en área en el entorno de 91,8%, obteniendo un coeficiente de fiabilidad mediante ensayo denominado Micro-Deval del entorno del 25%, todos estos datos fueron obtenidos en el propio laboratorio. En los análisis sobre la granulometría se puede ver en la tabla nº5-1 que atiende a la norma (UNE-EN 12620:2003+A1, 2009).

En relación a los áridos se eligieron aquellos que se suele usar el propio Laboratorio de Materiales de la E.T.S.I.C de la UPM, siendo estos proporcionados por una empresa ubicada en Paracuellos del Jarama en la Comunidad de Madrid, y cuyo nombre de la empresa corresponde a Hormigones Mariano Bravo e Hijos S.A. Para todo el proceso de hormigonado de las probetas de hormigón se utilizaron 245 kg de arena, y no más de 500 Kg de grava pero de este último solo se pudieron aprovechar 310 Kg.

Tabla n° 5-1. Granulometría de la arena utilizada

ARENA			
<i>Tamices (mm)</i>	<i>Retenido en Gramos</i>	<i>% Pasa Acumulado</i>	<i>Módulo Granulométrico</i>
63,00	0,0	100,00	0,00
31,50	0,0	100,00	0,00
16,00	0,0	100,00	0,00
8,00	0,0	100,00	0,00
4,00	16,7	98,35	1,69
2,00	79,6	90,39	9,67
1,00	278,3	62,39	37,60
0,150	261,5	36,25	63,79
0,25	192,4	16,80	83,12
0,125	117,4	5,15	94,89
0,063	43,5	0,79	
<0.063	7,9		
Suma	997,3	M.G.	2,92

Otra de las tareas importantes que se tuvieron que realizar durante el proceso fue el secado con estufas para no tener en cuenta los porcentajes de humedad de los propios áridos en el proceso de elección de la dosificación.

Las estufas disponían de unas características determinadas lo cual limitaban los procesos en cuestión tiempo tanto para las gravas como las arenas. La marca y modelo de las estufas corresponde a Científica 1010 y Proeti S.A., usadas a 100 ± 5 °C. Teniendo en cuenta todos estos parámetros y características de los modelos se obtuvo unos tiempos importantes en la pérdida de la humedad de los materiales, en el caso de la arena por su composición y características siendo aproximadamente de 14 horas. En la figura n°5-1 se pueden observar las estufas empleadas en el proceso de secado.

Figura nº 5-1. Proceso de Secado

5.2.1.3 Grava

Con relación a la grava se empleó una tipología silícea siendo ésta una relación de rodada con machaqueo teniendo una densidad de 2.62 kg/dm^3 . Además, se obtuvieron datos de laboratorio tales como el desgaste de coeficiente de los ángeles siendo éste de 28, y el coeficiente de forma 0,26.

El tamaño máximo del agregado fue de 12,5 mm. La grava fue sometida a cribado manual empleando los tamices especialmente normalizados con un tamaño máximo de 12,5 mm. La estufa empleada fue la misma que la de las arenas para el secado de la grava tal y como se observa en la figura nº5-1, pero con una diferencia de tiempo de secado, ya que en el caso de la grava duró aproximadamente 6 horas. En la tabla nº5-2 se puede observar el estudio granulométrico de la grava.

Tabla nº 5-2. Estudio granulométrico grava empleada (M.G. 12,5)

GRAVA			
TAMICES (mm)	Retenido gramos	% que pasa Acumulado	Módulo Granulométrico
63,00	0,0	100,00	0,00
31,50	0,0	100,00	0,00
16,00	2889,0	70,89	29,11
8,00	5965,0	10,75	89,25
4,00	1054,0	0,13	99,87
2,00	0,4	0,11	99,87
1,00	0,2	0,12	99,88
0,50	12,0	0,00	100,00
0,25	0,0	0,00	100,00
0,125	0,0	0,00	100,00
0,063	0,0	0,00	
< 0,63	0,0	0,00	
Suma	9920,6	M.G. M.G. 12,5	7,17 6,51

5.2.1.4 Agua

El agua empleada corresponde a un agua bien tratada y desinfectada con productos autorizados, y que garantiza la ausencia de riesgos en relación a su consumo. Dicha agua es la suministrada actualmente por la Comunidad de Madrid.

5.2.1.5 Aditivos

En relación a los aditivos no fueron necesarios porque el hormigón empleado era de características medias. Sin embargo, en el mercado existe una gran variedad para realizar modificaciones en el hormigón. A continuación, se reflejarán brevemente los aditivos más importantes teniendo en cuentas sus propiedades y características, ya que en un futuro no se descarta realizar uso de los mismos para líneas futuras de investigación.

Los aditivos para hormigón son productos diferentes del agua, y se incorporan a la mezcla de hormigón antes o durante su amasado con el único fin de modificar algunas de sus características, propiedades o comportamiento por acción física, química o físico-química.

Los aditivos del hormigón se añaden a la mezcla con el fin de modificar las propiedades de forma adecuadamente controlada. Estas propiedades son, la modificación del tiempo de fraguado (dichos aditivos serían; aditivos acelerantes y retardadores de fraguado), disposición de comportamiento frente a la helada y/o el control de la fluidez de la mezcla del hormigón (dichos aditivos serían aditivos reductores de agua o plastificantes). También se pueden añadir pigmentos colorantes al hormigón para obtener determinados efectos estéticos.

Tipos de aditivos de concreto

La norma (ASTM C494/C494M, 2017), propone la siguiente clasificación de aditivos de concreto:

- TIPO A : Reductor de agua (plastificantes)
- TIPO B : Retardador de fraguado
- TIPO C : Acelerador de fraguado
- TIPO D : Reductor de agua y retardador
- TIPO E : Reductor de agua y acelerador
- TIPO F : Reductor de agua de alto efecto
- TIPO G : Reductor de agua de alto efecto y retardador

El Centro Tecnológico del Hormigón (C.T.H) establece una clasificación semejante, añadiendo los aditivos incorporadores de aire.

Tabla nº5-3. Tipos de aditivos de hormigón – Tabla 29.2 EHE-08

TIPO DE ADITIVO	FUNCIÓN PRINCIPAL
Reductores de agua / Plastificantes	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Reductores de agua de alta actividad / Superplastificantes	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar significativamente la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Modificadores de fraguado / Aceleradores, retardadores	Modificar el tiempo de fraguado de un hormigón.
Inclusores de aire	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, para mejorar su comportamiento frente a las heladas.
Multifuncionales	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad.

Aditivo incorporador de aire

Los aditivos aireantes son aquellos que incorporan aire en forma de burbujas esferoidales de distinto tamaño, uniformemente distribuidas en la mezcla, para conseguir un hormigón resistente a las heladas. Los aditivos incorporadores de aire deben cumplir con la (NTP 334.089, 1999), según la normativa de México. Según (EHE-08, C.P. del Hormigón, 2011), en elementos pretensados mediante armaduras adherentes, no podrán utilizarse aditivos que tengan carácter de aireantes.

Aditivos acelerantes de fraguado

Los aditivos acelerantes acortan el tiempo de fraguado, aumentando la velocidad de desarrollo inicial de resistencia. Los acelerantes se aplican en hormigones y morteros proyectados y trabajos de hormigonado que requieren un rápido desencofrado, como en prefabricación, galerías húmedas, obras marítimas entre mareas, entre otros.

Aditivos retardantes

Por otro lado, los aditivos retardadores retrasan el inicio de fraguado, manteniendo por más tiempo la docilidad. Se emplean en hormigonados con tiempo caluroso, hormigones bombeados o en obras a gran distancia de la planta de hormigón.

Aditivos impermeabilizantes del hormigón

Los aditivos impermeabilizantes se emplean en hormigones que van a estar en contacto con el agua o terrenos húmedos y son eficaces en hormigones compactos. Aditivos reductores de agua para concreto (plastificantes). El uso de aditivos plastificantes y superplastificantes ha revolucionado la tecnología del hormigón en dos direcciones: en términos de reducción de la relación agua/cemento, lo que conlleva una mejora de las resistencias y durabilidad; en términos de trabajabilidad y mejoras en las propiedades reológicas de los hormigones.

Aditivos en la construcción

Los aditivos son empleados también en productos de inyección adherentes, que están constituidos por lechadas o morteros de cemento, y en hormigones autocompactantes, con el fin de facilitar su puesta en obra. El fabricante debe facilitar la certificación del producto debidamente identificada por una marca de calidad CE que garantice que el aditivo suministrado, en las proporciones y condiciones previstas, produzca los efectos deseados sin afectar al resto de características del hormigón ni a las armaduras, con atención a los aditivos que contienen ión cloro, cuyo contenido está limitado en las distintas normativas.

Los aditivos no deben contener cloruros, sulfuros, sulfitos u otros químicos que puedan ocasionar o favorecer la corrosión de las armaduras. La proporción de aditivos no puede superar el 5% en peso del cemento y su designación estará de acuerdo con lo indicado en la (UNE-EN 934-2, 2012), según (EHE-08, C.P. del Hormigón , 2011). Los aditivos para hormigón pueden ser pulverulentos, en pasta o líquidos y pueden modificar el comportamiento reológico del hormigón o su tiempo de fraguado.

Los aditivos se transportarán y almacenarán de manera que se evite cualquier tipo de contaminación, heladas, evaporación o deterioro que afecte a sus características. Los aditivos pulverulentos se almacenan en las mismas condiciones que los cementos mientras que los aditivos líquidos y los pulverulentos diluidos en agua se deben almacenar en depósitos protegidos de las heladas y que dispongan de elementos agitadores que mantengan los sólidos en suspensión. Los dosificadores para aditivos de las instalaciones de dosificación estarán diseñados y marcados de modo que se pueda medir con claridad la cantidad de aditivo correspondiente a 50 kilogramos de cemento.

Las normas venezolanas con referencia a los aditivos, son las siguientes: (COVENIN 356, 1983) aditivos químicos para concreto. Especificaciones, (COVENIN 357, 1989) Aditivos incorporados de aire para concreto. Especificaciones, (COVENIN 351, 1994) Aditivos químicos utilizados en el concreto. Métodos de ensayo, (COVENIN 355, 1994) Aditivos incorporadores de aire para concreto. Métodos de ensayo (COVENIN 356, 1994) Aditivos utilizados en el concreto. Especificaciones.

5.3. Proceso de fabricación de probetas de hormigón cilíndricas de hormigón

Uno de los objetivos principales de la presente tesis es desarrollar un conjunto de procedimientos de carácter experimental que puedan proporcionar información vinculada sobre aquellos materiales ligados a la construcción de probetas de hormigón emulando de manera experimental pilares de hormigón empleados en el ámbito de la construcción y/o edificación. Lógicamente, para poder realizar todo este proceso, y conseguir el objetivo final, se tuvo que ejecutar un estudio muy medido y controlado en el laboratorio desarrollando una programación precisa y bien coordinada de modo que se pudieran caracterizar cada material interviniente.

Las características específicas de áridos y cemento se determinaron de manera muy diferenciada. En consecuencia, la resistencia característica para el diseño del propio hormigón estuvo en el entorno de 25 N/mm^2 , teniendo en cuenta un tamaño máximo de árido de 12,5 mm, en una humedad correspondiente al 0%, teniendo presente los resultados de los módulos granulométricos vinculados a la arena de 2,92, y grava de 6,51, tal y como se indican en las tablas nº 5-1 y nº 5-2, y con ausencia de cualquier aditivo.

Este proceso de ejecución de hormigonado realizado en laboratorio resultó estar dentro de la fase experimental, y fue el que ocupó mayor tiempo por ser una tarea laboriosa. Se presentaron multitud de obstáculos que fueron trascendentales de superar para el devenir de la presente tesis. Estos obstáculos y problemáticas acaecidas entre otras fueron, por ejemplo, la selección de la propia dosificación para poder encontrar la más idónea.

Tal y como resultó el conjunto de problemas, y la cantidad de ensayos y pruebas que se tuvieron que ejecutar, se optó por emplear un hormigón con unas características que sin ser excepcionales son las más comunes en cualquier obra civil y/o edificación.

La capacidad máxima de la hormigonera del Laboratorio de Construcción de Materiales era de 30 litros. Esta circunstancia provocó realizar varias amasas iguales teniendo como referencia los datos de dosificación de la Tabla nº 5-4.

Tabla nº 5-4. Datos de dosificación del hormigón

<i>DOSIFICACIÓN para 30 litros de Hormigón</i>			
<i>IDENTIFICADOR</i>	<i>Material</i>	<i>Dosificación Kg/m³</i>	<i>Dosificación Kg</i>
1	Cem II B-M 32,5 R	291	8,65
2	Grava máximo 12,5	992	29,64
3	Arena	776	23,21
4	Agua	200 litros	5,96

Previamente, y para tener todo parametrizado el proceso se utilizó una balanza disponible en el Laboratorios de Construcción de Materiales de la E.T.S.I.C de la U.P.M, tal y como se observa en la figura nº5-2.

Figura nº5-2. Balanza de pesado de materiales

En este proceso se tuvo presente la eliminación de la temperatura de algunos materiales como los áridos para evitar su influencia en la mezcla durante la evaporación del agua. Obviamente, tal y como se describió anteriormente, todo este proceso estaba vinculado al vertido de estos materiales en bandejas para posteriormente ser usadas en las respectivas estufas. Después de todo este proceso se procedió al pesaje de materiales que era necesario para la fabricación del propio hormigón.

Se realizó el ensayo del Cono de Abrams (figura nº5-3), ensayo que permite el conocimiento del grado de consistencia del hormigón, y se realiza cada vez que se ejecuta una amasada. Dicho ensayo consiste en medir el revenimiento respecto al estado original una vez quitado el molde.

Para ello se dispone de una plancha metálica que sirve de base, sobre la que se coloca el cono metálico normalizado en el cual se vierte en capas de un tercio de la altura del cono para posteriormente compactar con 25 golpes cada una de las capas mediante una barra de acero lisa acabada en punta de bala. Una vez compactado, se retira el cono metálico de forma vertical dejando asentar el material y midiendo la diferencia de alturas. A continuación, se medirá el asiento del material con la altura del cono (tomado como referencia). De este modo, se establece el grado de consistencia del hormigón, tal y como se observa en la figura nº5-3.

Figura nº5-3 Ensayo Cono de Abrams

Una vez realizado el ensayo del Cono de Abrams, se procede a verter el hormigón en los moldes metálicos normalizados cilíndricos de 300 x 150 mm, del mismo modo que realizamos el llenado del Cono de Abrams; llenado un tercio de la altura y compactando el material con 25 golpes con la barra de acero acabada en punta de bala. Una vez llenado el molde metálico mediante un mazo de goma se dan unos golpes en el lateral del molde para evitar posibles huecos que hayan podido quedar, y completar la compactación. Se taparán con un trapo húmedo para evitar la evaporación, tal y como se observa en la figura nº5-3.

Posteriormente, se ejecutaron las amasadas correspondientes, tal y como se muestra en la figura nº5-4.

Figura nº5-4. Amasadora de homogeneización de materiales

Este equipo donde se fabrica el hormigón corresponde a una máquina amasadora considerada planetaria ubicada en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la E.T.S.I.C de la U.P.M, y cuya marca era ASEA. Es una máquina que dispone de unas características con algunas particularidades, tales como que tiene palas giratorias siendo estas fijas, y que son capaces de llevar la misma velocidad y ritmo para homogeneizar el hormigón a través de una cubeta o bidón metálico donde se van vertiendo los diversos materiales para poder conseguir el objetivo que no es otro que la fabricación del hormigón. Además, estas palas disponen de una peculiaridad, y es que se pueden levantar con relativa facilidad para proceder al llenado y/o la propia extracción del elemento fabricado (hormigón).

Por otra parte, es de vital importancia dentro del proceso de fabricación del hormigón la forma y el orden de verter los materiales en la propia amasadora. Normalmente, el orden suele ser verter toda la arena y grava hasta la máxima capacidad de la amasadora, y arrancar la amasadora para que se vayan mezclando estos dos materiales.

Posteriormente, se incorpora el cemento seleccionado y el agua, pero en el caso del agua se debe ser especialmente cuidadoso y realizar ese proceso poco a poco. Éste proceso tiene una duración de tres minutos que debe ser controlado con exactitud. En ocasiones, si la cuba es pequeña (como es el caso) será de especial ayuda una espátula y una llana para ayudar a mover el material, y evitar que se derrame tal y como se muestra en la figura nº5-4.

Obviamente, una vez transcurrido el tiempo delimitado, se procede al apagado de la máquina y levantado de las palas. Tal y como se ha ido describiendo el proceso anteriormente, se emplearon moldes metálicos circulares normalizados de 300 milímetros de alto por 150 milímetros de diámetro para la fabricación de las probetas de hormigón, siendo el área de la

sección transversal de las probetas de hormigón de 17.671 mm^2 . Este sistema de molde permite la reutilización en multitud de ocasiones con los cuidados adecuados. En la figura nº5-5 se pueden observar dichos moldes normalizados.

Figura nº 5-5 Moldes metálicos circulares normalizados (encofrados). Proceso relleno probetas hormigón. Tapado trapo húmedo

El objetivo era comenzar a rellenar los moldes circulares tal y como se muestra en la figura nº5-5. Una vez realizado el vertido de este hormigón se procede a la compactación completa. En el caso de las probetas de hormigón la compactación se ejecutó mediante una barra de acero con puntas de bala empleando 25 golpes por capa hasta llegar a las tres capas, de ese modo, quedarían todas las probetas de hormigón perfectamente compactadas.

Todas las probetas de hormigón quedaron tapadas con unos paños y/o trapos humedecidos con el objetivo de proteger al hormigón de la pérdida de agua que se produce en estos procesos evitando así la evaporación, y que siempre surge durante el fraguado, tal y como se muestra en la figura nº5-5.

5.4. Desmoldado de las probetas de hormigón

El proceso de desencofrado de las probetas de hormigón o más bien desmoldado es una tarea relativamente sencilla, aunque lenta. Este proceso se ejecutó al día siguiente de su fabricación. El proceso consistió en coger los moldes, y mediante unos tornillos con ayuda de una barra de acero abrirlos, algunos de ellos estaban duros por lo que se empleó una maza con taco de goma para hacer más fuerza en el proceso de apertura.

Una vez obtenida la probeta de hormigón de cada lote se procedió a realizar la limpieza del molde aplicándole un líquido desencofrante o diésel-oil para evitar la adherencia de hormigón en las paredes del encofrado metálico. No es estrictamente necesario el uso de gran cantidad de líquido sino más bien lo contrario. La limpieza es una cuestión fundamental para poder realizar nuevos usos de los moldes metálicos normalizados. En la figura nº5-5 se pueden observar los moldes y palancas de apertura.

Posteriormente, a cada probeta de hormigón se le puso una numerología y fecha de fabricación, además del número de lote correspondiente para poder identificarlas. Una vez finalizado el proceso de desmoldado del molde metálico de las probetas de hormigón, todas las probetas de hormigón se dejaron curar durante una duración de 28 días desde su fecha de fabricación en una cámara húmeda normalizada para tal fin con una temperatura de 20 ± 2 °C , y una humedad relativa del 98 %. En la figura nº5-6, se observan las probetas de hormigón sacadas de los moldes metálicos, y pasados los 28 días de curado de cada una de ellas

Figura nº5-6. Probetas reducidas curadas en cámara

Estas probetas de hormigón después del periodo de curado de 28 días, las superficies superiores e inferiores se deben dejar perfectamente lisas. Dichas probetas de hormigón de 300 x 150 mm, para conseguir su perfección en cuanto a la preparación de ensayo las caras superior e inferior deben ser igualadas mediante un refrentado. Es de vital importancia este proceso para que exista un buen encaje de superficies entre las bases de la probeta de hormigón, y el propio plato de la prensa con la que se realizará el ensayo.

5.5. Caracterización mecánica del hormigón

5.5.1. Tensión característica del hormigón

Para poder realizar la comprobación de la resistencia a compresión del propio hormigón, las probetas de hormigón fueron comprimidas hasta un punto máximo de la capacidad de rotura de la maquinaria de ensayo haciendo referencia a la norma (UNE-EN 12390-3., 2003), en cuyo caso se alcanzó la máxima carga. La prensa empleada corresponde al modelo MM-S/CPC de PROETI, S.A, dispone de una capacidad de carga de 150 toneladas. En la figura nº5-7, se puede observar la tipología de prensa empleada.

Figura nº5-7 Prensa empleada con capacidad de 150 Tn. Ensayo Compresión

Para poder realizar este ensayo se tuvo que ejecutar el refrentado de la probeta de hormigón tal y como se explicó anteriormente. Es fundamental central la probeta de hormigón en el plato de la prensa ajustando la prensa hasta que apoye para evitar movimiento, y todo ello, evitando la carga sobre la cara superior. La carga se aplicará a una velocidad no inferior a 1 tonelada/segundo hasta llegar al punto de rotura. En este caso, el ensayo fue positivo, por lo tanto, se siguió ensayando en la misma línea.

Siguiendo la misma dinámica se ensayaron 5 probetas de hormigón teniendo en cuenta el curado de los 28 días, obteniendo unas buenas resistencias en el entorno de los 25 N/mm^2 . Se adjuntan las tablas contrastadas normalizadas y caracterizadas relacionadas con la rotura, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Tabla n° 5-5. Ensayos compresión probetas de hormigón

<i>Ensayo</i>	<i>Tensión de rotura</i> <i>N/mm²</i>	$(x_i - \underline{x})$	$(x_i - \underline{x})^2$
1	25,5	1,40	1,96
2	24,6	0,50	0,25
3	23,1	-1,00	1,00
4	23,7	-0,40	0,16
5	23,6	-0,50	0,25

$$f_m = 24,10 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma = 0,851 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Distribución } N(24,10; 0,851) \quad [5.1]$$

$$P(f_c \geq f_{ck}) = 0,95 \quad f_{ck} = 24,10 \frac{N}{mm^2} - 1,64 \sigma = 22,7 \frac{N}{mm^2} \quad [5.2]$$

$$\text{Coeficiente de Variación} = \frac{\sigma}{\underline{x}} = 0,035 \quad [5.3]$$

5.5.2. Módulo de elasticidad

Se calculó el módulo de elasticidad en las probetas de hormigón en la prensa de 150 toneladas. Estos equipos suelen estar formados a su vez por equipos de medición de extensimetría y un equipo informático de apoyo que sirve entre otras cosas para controlar el proceso del ensayo y tratamiento de datos. En la figura n°5-8 se puede observar la composición de estos equipos.

Figura n°5-8. Preparación de ensayo para obtener el módulo de elasticidad

Se realizó un ensayo de una de las probetas de hormigón exactamente iguales a las que se iban a emplear para obtener la resistencia del hormigón en $1/3$ de su valor. Este dato es requisito fundamental para poder hallar la aplicación de carga, y su máximo valor representa al mencionado anteriormente. La probeta de hormigón es ensayada con unos medidores especialmente diseñados para realizar la deformación axial y diametral, donde se alojan unos anillos metálicos que van adheridos o fijados en la parte central de la probeta de hormigón.

La probeta de hormigón para poder realizarse el ensayo debe estar perfectamente centrada y ajustada en relación a la placa de la propia máquina mecánica. Es muy importante disponer de los ajustes adecuados en los captadores de medición en deformación que deben estar en valor 0. En ese momento, se procede a realizar el ensayo en la probeta de hormigón teniendo presente la velocidad oscilante de carga entre los valores $0,5 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$, llegando así a sus posibles valores máximos de velocidad.

Se mantendrá la carga durante un minuto para obtener la deformación. Posteriormente, habrá que invertir el sentido de la carga con la misma proporción en velocidad hasta tener la tensión inicial. En este proceso, se suelen realizar dos ciclos de carga más en relación a la carga y descarga. En la figura nº5-9, se pueden ver la preparación de ajuste y materiales empleados.

Figura nº5-9 Preparación de ajuste y materiales ensayo módulo de elasticidad

El resultado obtenido sobre el módulo de elasticidad en el lote de las probetas de hormigón sin refuerzo fue de 27.100 N/mm^2 . El cálculo del coeficiente de Poisson es fundamental para poder asimilar y entender el proceso de la teoría del confinamiento. Consiste en dilatar o expandir de manera transversal el material. Se empleó una camisa con tipología de envoltorio perimetral permitiendo la capacidad de aumentar de manera significativa a la capacidad de carga, y por otro lado, otorgar una característica fundamental que es la ductilidad muy

relevante al propio elemento estructural (probeta de hormigón). En este caso, el cálculo obtenido sobre el coeficiente de Poisson fue de 0,160.

Tabla nº 5-6. Cálculos relacionados con el módulo de elasticidad (sin refuerzo).

<i>Ensayo</i>	<i>Módulo de elasticidad</i> <i>N/mm²</i>	$(x_i - \underline{x})$	$(x_i - \underline{x})^2$
1	27.275,00	-2,56	6,5536
2	27225,1	-52,46	2752,0516
3	27.355,20	77,64	6027,9696
4	27.230,10	-47,46	2252,4516
5	27.302,40	24,84	617,0256

$$E_m = 27.277,56 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma = 107,896 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Distribución } N(27.277,56; 107,89) \quad [5.4]$$

$$P(E_c \geq E_{ck}) = 0,95 \quad E_{ck} = 27.277,56 \frac{N}{mm^2} - 1,64 \sigma = 27.100,51 \frac{N}{mm^2} \quad [5.5]$$

$$\text{Coeficiente de Variación} = \frac{\sigma}{\underline{x}} = 0,0039 \quad [5.6]$$

Tabla nº 5-7. Cálculos relacionados con el coeficiente de Poisson

<i>Ensayo</i>	<i>Coeficiente de Poisson</i>	$(x_i - \underline{x})$	$(x_i - \underline{x})^2$
1	0,160	0,0002	0,00000004
2	0,158	-0,0020	0,0000040
3	0,162	0,0022	0,0000048
4	0,160	0,0002	0,00000004
5	0,159	-0,0008	0,00000064

$$\mu_m = 0,16 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma = 0,0014 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Distribución } N(0,16; 0,0014) \quad [5.7]$$

$$P(\mu_c \geq \mu_{ck}) = 0,95 \quad \mu_{ck} = 0,160 - 1,64\sigma = 0,157 \quad [5.8]$$

$$\text{Coeficiente de Variación} = \frac{\sigma}{\underline{x}} = 0,0088 \quad [5.9]$$

Para la obtención de todos los valores característicos se usó la normativa técnica EHE-08, en la parte correspondiente al percentil de probabilidades del 0,05.

5.6. Material de refuerzo

5.6.1.- Resina imprimación

En este proceso, y de acuerdo al orden de aplicación, pasamos a describir los distintos materiales que se utilizan en el refuerzo. Para poder proceder a una caracterización adecuada de estos materiales, es estrictamente necesario obtener las características mecánicas de cada uno de estos componentes. El primero de ellos y que debemos considerar es la resina de imprimación, que básicamente es el material que regulariza y mejora la resistencia de la futura superficie de contacto. En esta tesis se tomarán los datos del material MAXPRIMER® -C, proporcionados por el fabricante al igual que las condiciones de uso.

No obstante, en el mercado existe una gran variedad de resinas de imprimación. A continuación, se describen brevemente algunas tipologías y características según el uso de las mismas, siendo estas:

- **Resinas Acrílicas y pigmentos micronizados para el efecto cubre manchas y antisalitre.** Imprimación antisalitre que aísla y reduce el efecto de recrecido de sales minerales presentes en los materiales de construcción, tales como; cemento, hormigón, Imprimación cubremanchas, antihumo, nicotina, etc. Como fondo sellador sobre paredes y madera para posteriormente revestir con un acabado adecuado, preferentemente de pinturas al agua. Tiene la ventaja de ser un producto al agua, por lo que, en interiores, su aplicación es lo más recomendable.
- **Resinas Alquídicas y tixotrópicas, especialmente modificadas. Tixotrópico.** Excelente imprimación cubremanchas, antihumo etc. Fondo sellador con bajo olor y propiedades tixotrópicas que favorecen la ausencia de descuelgues en su aplicación. Como fondo sellador cubremanchas y aislante sobre madera y paramentos, cuando se necesiten unas buenas propiedades de acabado. Bajo olor que facilita la aplicación en lugares habitados.

- **Resinas Acrílicas y pigmentos micronizados para el efecto cubre manchas. Tixotrópico.** Fondo sellador al agua y con propiedades tixotrópicas que favorecen la ausencia de descuelgues en su aplicación. Excelente imprimación cubremanchas, antihumo, nicotina, etc. Como fondo sellador sobre paredes y madera, para tapar manchas de nicotina, humos, lápices, etc., y en general de la mayoría de los productos que se usan habitualmente en los hogares, para posteriormente revestir con un acabado adecuado, preferentemente de pinturas al agua. Tiene la ventaja de ser un producto al agua, por lo que, en interiores, su aplicación es lo más recomendable.
- **Emulsión de copolímeros acrílicos de muy pequeño tamaño de partícula, en suspensión acuosa e internamente estabilizado.** Gran rendimiento. Sellador preparador de superficies difíciles. Por su pequeño tamaño de partícula presenta un elevado poder de penetración en paramentos porosos, que se traduce en una alta adherencia al soporte y entre capas, ejerciendo una función de puente entre el paramento y el revestido final. Debido a su naturaleza acrílica, presenta una excelente resistencia al agua, a los álcalis (cemento, uralita, cal, etc.) y una ausencia total de amarilleo. No ataca ni daña la piedra natural ni los materiales de construcción. Como fijador, para favorecer el anclaje de posteriores pinturas plásticas en paramentos de yeso, perliescayola y otros soportes difíciles de pintar (paredes nuevas), o bien en paramentos antiguos y ya pintados donde sean de prever caleos, desconchados y en general falta de adherencia al soporte de las posteriores capas de pintura, tanto en interiores como en exteriores. Admite el repintado antes de 24h. con todo tipo de pintura plástica en emulsión: acrílicas, vinílicas, etc.
- **Resinas Alquílicas, especialmente modificadas.** Fondo sellador y aislante. Como fondo sellador y aislante sobre madera y paramentos, cuando se necesiten unas buenas propiedades de acabado.
- **Anticorrosivo de alto espesor con muy buenas propiedades de adherencia y secado rápido.** Excelente resistencia al agua de mar y a la protección catódica. Muy buenas Propiedades anticorrosivas. Como imprimación general para el casco de los buques, fondos, flotación y costados. Sobre superficies de acero desnudo, sobre Shop primer o pinturas existentes.

- **Vehículo de Resina Alcídica especialmente modificada y pigmentada con alta concentración de anticorrosivo de Zinc metálico.** Como Imprimación para la protección anticorrosiva de calidad, para hierro y acero. La adherencia al acero galvanizado es excelente, si bien dada la gran cantidad de productos galvanizados, recomendamos hacer siempre una pequeña prueba.
- **Imprimación a base de resinas alcídicas de secado rápido y de alto rendimiento.** Imprimación adecuada para sistemas de pintado sobre hierro y madera con protección ignífuga. Se trata de una Imprimación para trabajos donde no se requiere una resistencia especial a ambientes agresivos. Por su rápido secado y gran rendimiento, es idónea cuando se precisan cortos períodos de tiempo para la manejabilidad de los objetos y las piezas pintadas.

5.6.2.- Resina Epoxídica

El material de adhesión entre tejido y hormigón es la resina epoxídica, cuyas características mecánicas y reológicas definen la eficacia del refuerzo. En este proceso se empleó la resina epoxídica para realizar la impregnación y adhesión a los tejidos de la fibra de carbono. Se utilizó el material denominado Maxepox-CS. Existen diversas misiones en relación a su utilidad, la primera de ellas es la de tener la capacidad para poder realizar una unión lo suficientemente fuerte con los tejidos de fibra de carbono siendo su misión la de crear una matriz. La segunda consiste en transmitir aquellos esfuerzos que se producen desde el propio hormigón hasta los tejidos de fibra de carbono.

Existen varias tipologías de resinas de este tipo, y de acuerdo a la temperatura, ya que si se emplean en periodos muy fríos se emplean aquellas cuyas temperaturas oscilan entre los 5° y 15°C, comercializadas bajo la denominación “W”, mientras que si la temperatura es más cálida se emplearían las que oscilan entre 15° y 35°C que son comercializadas con la denominación “S”. En el caso de la presente tesis se empleó la segunda comprendida entre 15° y 35°C, ya que la temperatura del entorno en las instalaciones se encontraba en esos parámetros.

Es una resina que se conoce con el nombre de compuesta ya que la disposición de la misma tiene dos materiales separados. Por un lado, disponemos de la resina epoxídica como base de

proceso, y por otro lado, el propio endurecedor. Ambos componentes deben ser debidamente mezclados en las cantidades idóneas para conseguir el objetivo tal y como se muestra en la figura 5°-10.

Figura nº5-10 Componente Resina Epoxídica y preparación.

Se prestó la situación de poder mejorar la ejecución del refuerzo ya que en algún caso fue necesario emplear un producto para poder rellenar algunos huecos muy pequeños, únicamente se usó en algunas probetas de hormigón. El producto se conoce como masilla de nivelación, donde existe mucha variación en el mercado.

El producto empleado en primera instancia de manera experimental se conoce con el nombre MAXEPOX-CP-S de Drizoro S.A. resina epoxídica, que suele usarse para tapar poros y/o huecos. Este producto tuvo un problema, y era la cantidad de mezcla que se debía usarse para tapar pequeñísimos huecos. Por ello, se decidió usar un mortero de reparación más cómodo de usarse e idóneo para el uso de las probetas de hormigón. El mortero de reparación responde al nombre de MAXREST.

Siguiendo las indicaciones del propio fabricante de la resina epoxídica, se ejecutaron diversos ensayos entre ellos a compresión y flexo-tracción, siguiendo las directrices indicadas en la normativa (UNE-EN 12620:2003+A1, 2009). Las características de esta tipología de resinas epoxídicas que fueron adquiridas a través de la empresa Drizoro S.A., son las que constan en la tabla nº 5-8.

Tabla nº 5-8. Propiedades mecánicas resina epoxídica.

DATOS TÉCNICOS MAXEPOX-CS			
		Versión S	Versión W
Intervalo óptimo De temperatura (°C)		15-35	5-15
Aspecto y color	principal	Pasta verde	
	endurecedor	Líquido amarillo	
Proporción A:B (en peso)		1:4	
Peso específico A 25°C	Principal	1,12	1,14
	Endurecedor	0,96	0,97
PotLife (minutos)	30°C	70	-
	23°C	130	25
	15°C	>180	60
	5°C	-	120
Tiempo de secado Al tacto (horas)	30°C	8,00	-
	23°C	11,00	4,00
	15°C	18,00	7,00
	5°C	-	18,00
Tiempo de curado (días)	30°C	5	-
	23°C	7	5
	15°C	14	7
	5°C	-	14

Temperatura de transición vítrea °C		65-70	
Resistencia a tracción (N/mm ²)		>29	
Resistencia a flexión (N/mm ²)		>39	
Resistencia a corte (N/mm ²)		>9,8	
Adherencia al hormigón (N/mm ²)		>2,5 rompe el hormigón	

Según los moldes normalizados para esta tipología de resinas epoxídica se emplearon dimensiones de 4x4x16 (centímetros). Este molde suele ser utilizado para la construcción de probetas de otros materiales como pudiera ser el compuesto por mortero. Esta tarea fue ciertamente laboriosa, y se tuvieron que valorar algunas alternativas al uso de los moldes con otros materiales como fue el uso de cinta adhesiva en el interior del propio molde para evitar que la resina se pegara, siendo esta alternativa muy útil para el desmontaje y obtención de la probeta de hormigón.

El equipo empleado en la ejecución de ensayos fue el de una prensa con capacidad de 20 toneladas cuyo modelo es CV-PC. Con esta prensa se ejecutaron tanto los ensayos a compresión como los flexo-tracción en probetas para otros materiales como el propio mortero ejecutado con cemento, como se puede observar en la figura nº5-11.

Figura nº 5-11. Ejecución Ensayos en flexo-tracción.

El problema fue que esta prensa con capacidad de 20 toneladas no fue capaz de realizar los ensayos de compresión y flexo-tracción. En ese momento, se decidió realizar los ensayos en la prensa disponible en el laboratorio con capacidad para ejecutar 150 toneladas. En dicha prensa se realizaron los ensayos de compresión de las probetas de hormigón. Las probetas diseñadas de resina fueron correctamente alineadas en la prensa según sus ejes y ángulos.

En este caso las roturas de las probetas de resina se ejecutaron de forma frágil y sencilla, aunque entrañó cierta peligrosidad ya que los pedazos de resina saltaron produciendo algunos daños en la zona de protección del metacrilato.

Los resultados superaron las expectativas ya que por ejemplo el ensayo de flexo-tracción superó los resultados esperados e indicados por el propio fabricante. Si se realizara la comparación de una probeta de otro material con el propio mortero compuesto por hormigón estarían en el entorno de 0,25-0,35 toneladas. En la figura nº5-12 se puede apreciar los resultados del ensayo.

Figura nº 5-12. Ensayo flexo-tracción. Tensión obtenida de 59,8 N/mm²

Por otro lado, se realizó el ensayo de compresión siguiendo la misma línea que el ensayo de flexo-tracción. El proceso de rotura en este caso tuvo dos peculiaridades siendo una de ellas que sobre la probeta se incorporó una plancha de acero de las mismas dimensiones que la probeta reducida de resina epoxídica de 16 cm², también se usó la prensa de 150 toneladas por

la misma razón que en el otro ensayo ya que la prensa de 20 toneladas no era suficiente para poder realizar la rotura. En la figura nº5-13 se puede observar los valores de ensayo.

Figura nº 5-13. Ensayo compresión de la probeta de resina epoxídica. Representación tensión-tiempo obteniendo una resistencia máxima de 15,18 Tn ($93,05 \text{ N/mm}^2$)

5.6.3.- Tejidos de Fibra de Carbono (CFRP)

El material más importante de todo este proceso corresponde a los tejidos de fibra de carbono ya que es la encargada de trabajar de manera conjunta con la resina epoxídica, y de poder realizar el confinamiento de probetas de hormigón con la capacidad de envolver toda la superficie del mismo. Por otro parte, la empresa (Drizoro S.A.U., 2013), en el sistema DRIZORO ® WRAP corresponde a un sistema de instalación normalmente en húmedo, y tiene como característica la composición de hojas de tejido seco de fibras de carbono de forma unidireccional, y que son las que se impregnan con la resina epoxídica en su uso habitual.

La tipología de resinas por saturación empleando la masilla y la imprimación son empleadas para unir y/o adherir los tejidos de fibra de carbono a la superficie del elemento estructural compuesto por hormigón. Normalmente, estos sistemas suelen ser húmedos y saturados para los lugares donde se aplican, y en su caso, disponen de una gran similitud con la puesta en obra del propio hormigón. La elección de los tejidos de fibra de carbono y/o hojas son las más adecuadas para reforzar las probetas de hormigón.

Existen diferentes tipologías de tejidos de acuerdo a las necesidades de los elementos a reforzar, en función de dichas necesidades hay que tener muy claro las características de estos sistemas de tejidos unidireccionales que tienen diferentes módulos de elasticidad, espesores y gramajes. En la tabla n°5-9 se puede observar las propiedades de los diferentes tejidos.

Tabla n° 5-9 Propiedades de los Tejidos de Fibra de Carbono

Datos Técnicos WRAP				
Producto	WRAP 200	WRAP 300	WRAP 600	WRAP HM
Aspecto	Tejido negro plano de fibra de carbono unidireccional			
Espesor (mm)	0,111	0,168	0,333	0,163
Gramaje (g/m ²)	200	300	600	300
Módulo de Elasticidad (N/mm ²)	230.000,00			440.000,00
Tensión de Rotura a tracción (N/mm ²)	>4200,00			>3300,00
Deformación en rotura (%)	1,6			0,66

5.6.4.- Material compuesto de Refuerzo. Fabricación de Talones

Lo más importante a la hora de realizar un diseño de un refuerzo por confinamiento es tener conocimiento de las características de los materiales compuestos, es este caso son dos, por un lado, la propia resina epoxídica con la imprimación sobre los tejidos de fibra de carbono

donde además habrá que tener en cuenta la última capa de recubrimiento. En la tabla anterior nº5-9 se pueden apreciar las características del propio fabricante.

En consecuencia, el compuesto más importante es la unión de tejidos de fibra de carbono con la propia resina epoxídica. Debido a la importancia de la misma se adoptó la decisión de ejecutar ensayos en esta línea. Estos ensayos se realizaron bajo la norma (ASTM D3039M, 2017) de donde se consideraron algunos procesos. La norma nos indica cómo han de realizarse las probetas, es decir, su proceso de fabricación y preparación indica su forma y las dimensiones recomendadas. Los ensayos realizados fueron a tracción, y caracterizados bajo la tracción uniaxial. A pesar de ello, se decidió realizar los ensayos de tejido de fibra de carbono con resina con unas dimensiones diferentes, donde los resultados fueron muy favorables llegando a ser satisfactorios. En la figura nº5-14 se observa el diseño de las probetas según norma.

Figura nº 5-14 Diseño de probetas

Las probetas se confeccionaron con unas dimensiones de 315x50 mm, con 150 mm entre talones rectangulares. Debido a la naturaleza del material, se optó por utilizar talones (metálicos) que protegiesen las mordazas. Además, se reforzó la zona extrema con una doble capa adicional de tejido de fibra de carbono para evitar la rotura en esta zona, y forzar a que dicha rotura ocurriera en la zona central. El espesor de la capa de fibra más la resina en la zona central es de 0.8 mm.

PROCESO DE EJECUCIÓN

PREPARACIÓN PREVIA

Talones.- Se prepararon desbastando primero y afinando después todas sus superficies de manera que no quedasen filos o puntos cortantes. El borde anterior se biseló y fue redondeado, y la superficie en contacto con la fibra se preparó para conseguir más agarre. Posteriormente, y antes de formar la probeta, se limpiaron las superficies con disolvente para evitar grasa o polvo adherido.

Fibra.- Se cortaron con las dimensiones establecidas. Primeramente, con un poco más de longitud, y en relación al ancho, se aprovechó la propia trama de la fibra, ya que de lo contrario hubiera sido difícil cortar a cualquier ancho debido a la gran densidad de fibra, y su pequeño espesor. Igualmente, cuando se corta en sentido perpendicular se ejerce cierta resistencia al corte con tijera, por ello, se han cortado previamente con algo de holgura para poder afinar mejor posteriormente. En la figura nº5-15 se puede observar el rollo de tejido de fibra de carbono.

Figura nº 5-15 Rollo de Tejido de Fibra de Carbono preparado para las medidas.

Preparación teniendo en cuenta fibra y talones

El mismo proceso se siguió para los pedazos de fibra que se colocan en los extremos para dar más resistencia a esa zona. Se prepararon, además de las 5 probetas a ensayar otras 5 probetas para ensayos previos. En la siguiente fase de montaje se preparó una superficie plana y consistente con una madera gruesa, recubierta de melanina (encimera de cocina). Ésta se recubrió con papel celofán para evitar que se adhiriese la resina, y sobre ella se dibujaron con precisión la forma de las probetas. En la figura nº5-15 se puede observar la preparación del corte de tejido de fibra de carbono para ensayo.

MONTAJE

Con todos los elementos dispuestos y preparados se procedió a montar las probetas. De los ensayos previos se advirtió que era muy importante seguir un orden en la colocación de las siguientes capas, que si bien se alarga el proceso previene las posibles deformaciones que pudiera sufrir en el proceso.

1.- Se coloca la tira de fibra de vidrio sobre su marca, y se procede a impregnarla de resina epoxi. Siempre en el sentido de sus fibras y con el máximo cuidado para no deshilacharla, extendiendo primero someramente con espátula, y finalmente aplicando más presión con el rodillo.

2.- Inmediatamente, en este mismo momento y con la resina fresca, admitiendo sucesivas capas, se procede a colocar la tapa de fibra de refuerzo en ambos extremos. Esta fase es delicada, ya que cualquier esfuerzo o movimiento transversal a la fibra tiende a deshilacharla por los lados. Una vez colocadas se dejan reposar durante 24 horas para que la resina adquiera resistencia.

3.- Transcurridas 24 horas se procede a despegar las tiras del papel celofán. Se prepara una nueva superficie y se colocaron de nuevo las tiras con la cara vuelta para realizar el mismo procedimiento anterior.

4.- Tras dejar pasar otras 24 horas, y ahora sin moverlas ni despegarlas, se colocó el talón metálico de la parte superior. Se prefirió impregnar toda la superficie que ocupaba éste, cuidando que no rebosara por la parte anterior, es decir, la zona más próxima a la previsible rotura. Colocados los talones, y pasados unos minutos, se colocó encima una superficie plana que los abarcase, de modo que el peso forzase una unión más íntima. Este lado es muy importante porque es el que nos servirá de referencia a la hora de la colocación en las mordazas de la máquina. Por lo tanto, en ese punto se cuidó la alineación perfecta del lado en ambos talones entre si, y con la dirección de la fibra idónea.

5.- Nuevamente, se esperó 24 horas para poder dar la vuelta a las probetas y colocar los talones del lado contrario. La razón de un procedimiento tan largo, y de no haber acertado las fases pegando por ejemplo todas las tiras al mismo tiempo, es que el espesor que se gana en

los extremos hace que combe en el centro y no quede perfectamente plana. Por otro lado, al colocar los talones si se hace al mismo tiempo que las otras fibras se corre el riesgo de deslizamiento, y que se salga de su posición por la naturaleza de la resina epoxi. Una vez acabado el proceso fueron colocadas sobre una superficie plana y guardadas en un cuarto aislado a una temperatura constante de 26 °C, y con poca humedad.

Figura nº 5-16 Montaje y preparación. Uso celofán, y finalización de probeta

ENSAYO

Los ensayos de rotura se realizaron 15 días después del montaje de las probetas. Anteriormente, se había probado el proceso con unas probetas montadas a tal fin para tener controlado el procedimiento, y la sistemática. Estos resultados fueron trascendentales, ya que la máquina que tenía que realizar la tracción produce una precompresión primera a la pieza que tiene entre las mordazas. Esto en una barra de acero no tiene la menor importancia, pero en nuestro caso podría producir unos efectos que alterasen los resultados, por ello, a la hora de realizar los ensayos había que estar muy atentos, y empezar el ensayo justo antes de que la mordaza produjese el agarre total.

Otro factor importante es la propia colocación de la probeta en la máquina. El talón ha de ser cogido en toda su extensión salvo los últimos 5 y/o 6 mm por la mordaza para evitar roturas cerca de esa zona, que además, en nuestros ensayos previos se produjo antes de tiempo. La

alineación es otro factor muy importante ya que pequeñas desviaciones producen una pérdida de resistencia, o más bien una disminución del valor de tracción que se alcanza en la prueba.

Las probetas se colocaron y recolocaron, algunas varias veces antes de dar el visto bueno, y empezar en ensayo de tracción. Se utilizó como referencia los lados de los talones que al pegarlos se habían puesto con especial cuidado para estar alineados entre ellos y con la tira de fibra principal.

Se realizó el ensayo de tracción en una máquina de ensayo universal UMIB-600 de la empresa Ibertest, con capacidad de 60 toneladas. La velocidad de tracción se fijó en 2 KN/min. La temperatura en el laboratorio de 25°C. En la figura nº5-17 se observa la preparación y estado final de los ensayos.

Figura nº 5-17 Flexión producida inicio de ensayo. Probeta de prueba con nivelado. Ensayo finalizado. Estado final del ensayo de tracción de la probeta

5.7.- Caracterización mecánica del material compuesto

La problemática de este ensayo es que no pudieron emplearse bandas extensiométricas, por lo que fue imposible poder obtener el módulo de elasticidad. Se mantiene una actitud lineal y elástica ante la rotura. A continuación, se adjuntan los resultados obtenidos en tracción según se observa en las figuras nº5-17.

Tabla nº 5-10. Resultados ensayos a tracción laminado de refuerzo

COMPUESTO TEJIDO RESINA				
Material	FIBRA		RESINA	COMPUESTO
Modelo	D.WRAP300	D.WRAP HM	MAXEPOX	
Espesor (mm)	0,167		0,727	0.8
Resistencia a tracción (N/mm ²)	3400		29	635
Modulo de Young (N/mm ²)	2,3x10 ⁵		0,015x10 ⁵	0,43x10 ⁵

La tensión de tracción característica obtenida fue de $\sigma_t = 584 \frac{N}{mm^2}$

$$f_m = 600,2 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma = 9,25 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Distribución } N(600,2; 9,25) \quad [5.10]$$

$$P(f_c \geq f_{ck}) = 0,95 \quad f_{ck} = 600,2 \frac{N}{mm^2} - 1,64 \sigma = 584 \frac{N}{mm^2} \quad [5.11]$$

$$\text{Coeficiente de Variación} = \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,015 \quad [5.12]$$

En consecuencia, para todo el diseño teórico experimental de las probetas de hormigón se empleó el valor de la tensión de tracción característica $\sigma_t = 584 \frac{N}{mm^2}$. A pesar de ello, el ensayo fue ejecutado sin coacciones laterales, donde no hubo interferencia alguna y ejerciendo una acción axial directa. Por el contrario, cuando una cara está adherida a la superficie unas de las deformaciones son similares a las ejercidas como en un pilar en edificación.

Tabla nº 5-11. Ensayos a tracción. Valores experimentales

RESISTENCIA	PROBETA	E [N/mm ²]	R _T [N/mm ²]	C _R [kN]
BAJA	1	26.345	616,0	27,69
	2	26.125	601,2	26,89
	3	26.688	587,3	26,41
	4	26.836	597,1	27,14
	5	26.556	599,4	26,84

5.8.- Proceso de refuerzo de las probetas de hormigón

Es muy importante mantener la resistencia estructural del elemento, y por ese motivo, todas las superficies de las probetas de hormigón deben estar en perfectas condiciones, es decir, una superficie fiable y limpia. En consecuencia, la superficie es conveniente que esté libre de suciedades, aceites, o cualquier otra sustancia que pudiera afectar al proceso de adherencia ya que es clave en proceso. Si esta situación se descuida podría producir un riesgo en la adherencia provocando un refuerzo débil llegando a ser un refuerzo con falta de eficacia.

Para ese tratamiento se empleó en primera instancia un pequeño cepillo de púas fuertes y rígidas que servían para eliminar los posibles restos de que pudiera dejar los moldes de las probetas de hormigón. En este caso, únicamente se realizó un pequeño repaso en la mayoría de las probetas de hormigón, ya que dichas probetas estaban bien formadas.

Figura nº 5-18 Uso cepillo púas duras limpieza superficial de probetas de hormigón

El proceso de impregnación es importante ejecutarlo adecuadamente para evitar problemas de adhesión, y que sea eficiente. El proceso de refuerzo fue sin duda alguna el más importante de todos ya que es un proceso de ejecución muy complejo, difícil y laborioso. Se ejecutó el proceso sobre 15 probetas de hormigón.

Este proceso fue ejecutado en tres de los cuatro lotes de probetas de hormigón fabricadas. El 1º lote corresponde a 5 probetas de hormigón donde no fue necesaria la aplicación de refuerzo alguno, ya que su misión fue la de ser testigo. El 2º lote de 5 probetas de hormigón corresponde a las probetas con una capa de refuerzo pasivo. Por otro lado, el 3º lote de 5 probetas de hormigón corresponde a probetas con dos capas de refuerzo pasivo. El último lote de 5 probetas de hormigón corresponden al 4º lotes que está ligado al refuerzo con una capa

de refuerzo activo, y que será explicado detenidamente en el punto 5.8.2 del presente documento.

La aplicación de la primera capa de resina epoxídica con adhesivo tuvo un trabajo previo que era la preparación de los cortes de tejido de fibra según las dimensiones teniendo en cuenta las dimensiones específicas según la planificación semanal. En la figura nº5-19 se puede observar los despieces previos.

Figura nº 5-19. Despiece de los tejidos de fibra de carbono

Tal y como se argumenta en el párrafo anterior se tuvo que tener en cuenta las dimensiones adecuadas, pero además se tuvo que añadir un solapamiento de 20 cm. Este solape es fundamental en la construcción del refuerzo adecuado, y evitar problemas de rotura en la unión de los tejidos. Las dimensiones para las probetas de hormigón en función de su refuerzo se desarrollan a continuación.

Los cortes de los tejidos de fibra de carbono se realizaron con unas tijeras grandes, pero de uso normal. Dichos cortes fueron adecuadamente almacenados para evitar entre otros factores que el propio tejido sufriera algún tipo de deterioro como por ejemplo arrugas etc. Estas tijeras fueron empleadas en todos los procesos de corte de tejidos de fibra de carbono del resto de lotes.

Para poder realizar el proceso de adhesión y/o pegado de todos los tejidos de fibra de carbono cortados anteriormente se empleó la resina MAXEPOX-CS-S. Como se ha ido explicando a lo largo del documento esta resina es capaz de proporcionar una matriz que mantiene los tejidos de fibra de carbono, y servirá para poder transmitir los esfuerzos desde el propio

hormigón hasta los propios tejidos de fibra de carbono. En este proceso se utilizó un batidor giratorio eléctricamente a velocidad lenta para que la mezcla sea correcta, y evitar la aparición de burbujas de aire, dado que esa circunstancia podría poner en riesgo el proceso de mezcla eficaz. En la figura n°5-20 se puede observar el batidor de resina.

Figura n°5-20. Preparación de mezclado con batidor de la resina epoxídica

5.8.1. Probetas de hormigón con una capa de refuerzo pasivo

El refuerzo pasivo consiste en una acción de confinamiento ejercida por la chaqueta de tejido de fibra de carbono sobre el núcleo de la probeta de hormigón; es decir, esta presión surge como resultado de una expansión lateral significativa del hormigón bajo compresión axial. En definitiva, la tensión de confinamiento aparece cuando el tejido de fibra de carbono se tensiona y esto ocurre solamente cuando la deformación transversal del hormigón es importante. Posteriormente, la tensión de confinamiento (f_l) va aumentando proporcionalmente a la expansión lateral de la fibra del refuerzo, hasta el colapso, cuando el tejido de refuerzo se rompe. La distribución de lotes fue la siguiente:

- Lote 1°. Probetas de hormigón sin refuerzo (testigo). No fue necesario uso de refuerzo.
- Lote 2°. Se emplea una capa refuerzo de tejido de fibra de carbono. El ancho del rollo de tejido es de 300 mm. Fue necesario 750 mm largo.
 - Solape de 200 mm.
 - Aplicado a lotes de 5 probetas de hormigón.

La primera capa de resina fue aplicada en el 2º lote de probetas de hormigón a confinamiento pasivo ejecutándose de manera vertical sobre una mesa, y a su vez, sobre un tablón de madera, y empleando el uso de una espátula directamente sobre la superficie de la probeta de hormigón. Una vez realizado este proceso, y estando aún fresca la resina se colocó la primera capa de refuerzo de tejido, tensándola y presionando de forma manual, empleando además un rodillo de manera que se pudieran eliminar las burbujas de aire.

Este primer proceso de pegado se realizó observando que funcionaba el sistema con pruebas anteriormente realizadas, para poder ejecutar con éxito el primer pegado del 2º lote. El proceso resultó ser satisfactorio. La finalización del proceso se muestra en la figura nº5-21.

Figura nº 5-21. Sistema de pegado sobre mesa y tablón de madera. Estado final

5.8.2.- Probetas de hormigón con dos capas de refuerzo pasivo

En el caso del lote 3º donde se pusieron dos capas de tejido de fibra de carbono (confinamiento pasivo) se procedió de la misma forma que en el lote 2º. En este caso, y siguiendo la misma dinámica que en el lote 2º, se pusieron las probetas sobre una mesa, y a su vez sobre un tablón de madera para facilitar el giro.

Se impregnó la primera capa de resina sobre la probeta, y aprovechando que aún estaba húmeda la resina se procedió a ir colocando el tejido de fibra. En esta ocasión la dificultad era aún mayor que en el lote nº2 ya que se impregnaría la doble capa de tejido de fibra de carbono.

- Lote 3°. Se emplean dos capas refuerzo de tejido de fibra de carbono. El ancho del rollo de tejido es de 300 mm. Fue necesario 1400 mm largo.
 - Solape de 200 mm.
 - Aplicado a lotes de 5 probetas de hormigón.

La labor fue compleja ya que se tuvo que ir intercalando el uso de una espátula y rodillo para evitar la aparición de burbujas de aire. El proceso finalizó con éxito, y se consiguieron ejecutar los lotes 2° y 3° de probetas de hormigón con confinamiento pasivo, siendo el lote 2° con una capa de tejido, y el lote 3° con dos capas de tejido. Se adjunta la figura nº5-22 con la finalización del proceso del 3 lote.

Figura nº 5-22. Sistema de pegado sobre mesa y madera. Origen y resultado

5.9.- Probetas de hormigón con una capa de refuerzo activo

El propósito de este proceso es que desde el inicio exista una pequeña tensión de confinamiento, y esto solo es posible introduciendo una tensión circunferencial inicial (σ_i) durante de pegado del tejido a la superficie lateral de la probeta. Con lo que se modificará también el módulo de elasticidad inicial ya que el conjunto adquiere mayor rigidez.

En consecuencia, para el lote nº4 correspondiente a 5 probetas de hormigón con refuerzo activo se diseñó un sistema único e innovador. A estas probetas de hormigón con una capa de refuerzo se le aplicaron 135 Newton a manera de confinamiento activo, incorporándoles así mayor rigidez y mejorando el módulo de elasticidad inicial de dichas probetas, de modo que

el refuerzo participase desde el primer instante en que el conjunto esté sometido a compresión axial.

Se tuvo en cuenta que las bandas extensiométricas se colocasen en las zonas centrales, tal y como se explicó a lo largo de la presente tesis.

En virtud de la bibliografía consultada, y teniendo en cuenta que las estructuras prestan sus servicios en capa elástica, se entendió que al objetivo inicial de la tesis introducir un segundo objetivo que es modificar el módulo de elasticidad inicial. Para ello se ideó una forma de introducir una tensión inicial durante el pegado del refuerzo. Éste es el motivo por el cual se planteó un 4º lote diferente a los anteriores con un proceso de refuerzo absolutamente diferenciador con el resto. El lote 4º consta de las siguientes características:

- Lote 4º. Se emplea una capa refuerzo de tejido de fibra de carbono. El ancho del rollo de tejido es de 300 mm. Fue necesario 900 mm largo.
 - Solape de 200 mm.
 - Anclaje barra de madera de 150 mm..
 - Aplicado a lotes de 5 probetas de hormigón.

Para el proceso de pegado de los tejidos de fibra de carbono se ejecutó un diseño único mediante un sistema ideado especialmente para este propósito, empleando un rodillo de rodadura donde poder realizar el pegado adecuadamente. El diseño dispuso de un soporte metálico con una altura libre de 1000 mm que permitió salvar la longitud de envoltura en solape y anclajes. En la parte superior se pegaron dos trozos de madera en forma de rail. En la figura nº5-26 se puede observar el diseño de rodillo

Figura nº 5-23. Sistema de rodillo para realizar el pegado

Se ejecutó el pegado con resina a la barra de anclaje de madera con los tejidos de fibra de carbono ya que ese proceso previo era fundamental para poder comenzar el pegado adecuadamente según se observa en la figura nº5-23.

Este primer proceso de pegado a la barra de anclaje de madera se realizó viendo que funcionaba el sistema con pruebas anteriores. Una vez pegado a la barra de anclaje el tejido de fibra de carbono con la medida seleccionada para la capa se dejó 24 horas para que el compuesto hiciera su labor endurecedora, y dar las garantías al proceso tal y como se observa en la figura nº5-24.

Figura nº 5-24. Sistema de pegado a tablón para comenzar el proceso. Parte I

Se decidió realizar el proceso de refuerzo en el Laboratorio de Materiales de Construcción de manera horizontal por la comodidad que ello tenía, aunque es sabido que los elementos estructurales de hormigón suelen estar en la mayoría de los casos de manera vertical.

Otra de las tareas laboriosas que se tuvo que realizar para poder ejecutar el proceso de rodadura para ir pegando el tejido de fibra fue que a cada probeta de hormigón se le pegaron en los extremos unas pequeñas probetas también de hormigón de menor dimensión que hicieran rodar adecuadamente los lotes de dichas probetas. Este proceso aseguraba a la perfección la rodadura de la probeta de hormigón a través del sistema diseñado para tal fin.

En el diseño se tuvo presente la separación entre extremos de rodadura fueran de 320 mm, ya que la probeta de hormigón su ancho era de 300 mm, esa holgura sería fundamental para poder realizar el giro de la propia probeta de hormigón mientras se realizaba el pegado con la resina epoxídica.

En la figura nº5-25 se puede observar como en los extremos de la probeta de hormigón se adhiere la resina para fortalecer el enlace de probeta, y apoyos en la rodadura marcando adecuadamente en la parte central, y asegurar que el giro fuera homogéneo en todo momento. Se pegan dos probetas cilíndricas de menor diámetro en las caras inferior y superior de forma concéntrica que servirán de ejes de rotación del conjunto.

Figura nº 5-25. Sistema de pegado a tablón para comenzar el proceso. Parte II

Para todo el proceso de pegado se utilizaron dos herramientas existentes en el Laboratorio de Materiales siendo una espátula y un rodillo para los pedazos de tela más extensos. La tipología del proceso consistió en que todo fuera homogéneo tanto en el pegado como la adhesión, ya que había que evitar por todos los medios la aparición de burbujas de aire. El uso de rodillo siempre se empleó en la dirección de las fibras de carbono, ya que de ese modo garantizaba la homología de proceso y evitaría la aparición de efectos que pudieran ser negativos para el proceso.

Con la superficie limpia e impregnada, se ancla un extremo del tejido a una línea generatriz a la probeta cilíndrica mediante un fino cordón de resina epoxídica. A continuación, se realiza la misma operación anclando el otro extremo a una barra rígida de madera de donde colgaran tres pesos de 45 Newton cada uno. En total se introdujeron 135 Newton a manera de confinamiento activo, incorporando así mayor rigidez y mejorando el módulo de elasticidad inicial de la probeta de hormigón, es decir, que el refuerzo participase desde el primer instante en que el propio conjunto estuviese sometido a compresión axial.

Las pesas mencionadas anteriormente estaban adecuadamente dimensionadas, y pesadas en balanza especialmente para todo este proceso. En la figura nº5-29 se puede observar el pesaje de una de las tres pesas empleadas en el proceso de estos lotes.

Figura nº 5-26. Balanza de pesaje

Una vez endurecida la resina epoxídica, se procede a pegar el tejido, aplicando una fina capa de resina en la superficie lateral del cilindro. A continuación, se coloca el conjunto sobre el rail antes mencionado, de manera que el tejido de fibra de carbono queda sometido a una tensión de tracción simple de $\sigma_i = \frac{135}{0,167 \cdot 300} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 2,64 \text{N/mm}^2$ [5.13]

Al rotar sobre el rail el conjunto, se logra introducir una tensión perfectamente uniforme sobre la superficie lateral del cilindro. Al enrollar, incluido el solape (de 200 mm), se ancla el conjunto, y se deja durante 48 horas para permitir el endurecimiento de la resina epoxídica.

La variación con los procesos anteriores lote 2º y lote 3º, es que se colgaron tres pesas que tensaban el tejido de fibra de carbono, es decir, desde el primer instante el tejido estaba

trabajando ya que se estaba aplicando una tensión homogénea. Este proceso fue el más duro y laborioso por el tiempo de dedicación al igual que la peligrosidad que entrañaba. En la figura nº5-27 se puede observar la colocación de las pesas, proceso de aplicación en rodillo y estado final.

Figura nº 5-27. Aplicación rodillo para el confinamiento activo con tres pesas. Proceso finalizado confinamiento activo con tres pesas aplicando tensión

El resultado final en el proceso del confinamiento activo fue tal y como se observa en la figura nº5-27. Pasadas 48 horas para asegurar el proceso de pegado se quitaron las pesas con sumo cuidado. Una vez realizado dicho paso se procedió de la misma manera que en los lotes anteriores.

Todo este proceso de laboratorio y experimentación requirió protección para el personal siendo necesario el uso de guantes latex, batas, guantes de obra e incluso botas con refuerzo. Uno de los objetivos siempre fue afianzar la seguridad en el interior del laboratorio de materiales.

Al cabo de las 48 horas se retiran los pesos, y se recorta el tejido para quitar la barra rígida de madera. Al mismo tiempo, con un pequeño golpe lateral, se quitaron los dos cilindros de las caras superior e inferior, además de aplicar manualmente un lijado adecuado para dejar las caras de las probetas de hormigón perfectamente preparadas y estuvieran en las mejores condiciones para proceder a realizar los ensayos correspondientes. Al final de este procedimiento se obtuvieron 5 probetas listas para proceder a ensayo. La probeta de hormigón fue tal y como se observa en la figura nº5-28.

Figura n° 5-28. Restos de material en los extremos que fueron eliminados adecuadamente

Con todo ese proceso ejecutado se calculó el módulo de elasticidad tal y como se observa en la tabla n°5-12.

Tabla n° 5-12. Cálculos del módulo de elasticidad con una capa de refuerzo activo

<i>Ensayo</i>	<i>Módulo de elasticidad N/mm²</i>	$(x_i - \underline{x})$	$(x_i - \underline{x})^2$
1	31.004,10	-303,4	92.051,56
2	31605,2	297,7	88.625,29
3	31500,4	192,9	37.210,41
4	31271,1	-36,4	1324,96
5	31156,7	-150,8	22.740,64

$$E_m = 31.307,51 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma = 491,88 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Distribución } N(31.307,51; 491,88) \quad [5.14]$$

$$P(E_c \geq E_{ck}) = 0,95 \quad E_{ck} = 31.307,51 \frac{N}{mm^2} - 1,64 \sigma = 30.500,81 \frac{N}{mm^2} \quad [5.15]$$

$$\text{Coeficiente de Variación} = \frac{\sigma}{\underline{x}} = 0,016 \quad [5.16]$$

CAPÍTULO 6

Análisis de Resultados Experimentales

6.1. Generalidades

En el capítulo número 5 de la presente tesis se describen los materiales utilizados tanto para la construcción de las probetas de hormigón como el propio refuerzo. Todos se ejecutaron de manera experimental, para posteriormente someterles a la tipología destructiva designada. Una vez realizado los ensayos se realizó un tratamiento de datos siendo estos contrastados para obtener una variable normalizada, y posteriormente, obtener un coeficiente de variación para cada variable.

Con todo el proceso e información se procedió a realizar un análisis de los resultados en las probetas de hormigón siendo estos de carácter experimental. El primer paso de comparación sería observar el comportamiento elástico y anelástico del hormigón, y finalmente, la propia rotura de las probetas de hormigón.

En las probetas de hormigón se tuvo presente que los extremos deberían de coincidir con los puntos de inflexión propios de la deformada de Euler, y por las dimensiones de las probetas,

éste elemento estructural estuvo sometido a un esfuerzo axial donde se despreció la esbeltez y cualquier momento flector.

6.2. Probetas de hormigón sin refuerzo CFRP

6.2.1. Estudio teórico

Para el diseño y dimensionamiento de pilares de hormigón armado, según la (EHE-08, C.P. del Hormigón , 2011), (Romero Gago, F. , 2008) y (EB. Comité Euro-International du Béton, 1984), deben definirse claramente los criterios que caracterizan el comportamiento esperado del pilar. La forma más adecuada es en términos de estados límites, que se define como aquellos que más allá de los cuales la estructura deja de cumplir su función o de satisfacer las condiciones para las que fue proyectada. La base del método es diseñar sobre el estado límite más crítico, y comprobar después que la probabilidad de alcanzar los otros estados límites sea prácticamente nula.

El ACI (ACI 440.2R-17 , 2008), (ACI 440.2R-02. Michigan, 2002) y (ACI Committee 440, 1996), establece que el requisito básico para el proyecto de un elemento sometido a compresión se exprese como:

$$U \leq \text{Resistencia Nominal del pilar} \quad [6.1]$$
$$U \leq \phi R \quad \text{siendo } \phi = 0,70$$

Por otro lado, incrementa la carga por factores de mayoración, tomando en cuenta su naturaleza (viva o muerta). Para el proyecto de elementos estructurales sometidos a carga axial, el código ACI considera la siguiente expresión:

$$\text{Carga de rotura} = 0,85 f_{ck} A_c + f_s A_s \quad [6.2]$$

Expresión que no tiene en cuenta el pandeo ni la presencia de ningún momento flector. Como en nuestro caso, la probeta de hormigón carece de armadura, con lo cual, la carga de rotura es:

$$N_{u,Teórico} = f_{ck} A_c = 401 \text{ KN} \quad [6.3]$$

Se sabe también que existe una primera fase de la curva tensión-deformación, en la que ésta es lineal hasta aproximadamente una deformación axial de $\epsilon \approx 0,0004$. Por lo que la carga teórica de límite elástico será:

$$N_{e.Teórica} = 0,0004E_{ck}A_c = 190 \text{ KN} \quad [6.4]$$

6.2.2. Instrumentación y ensayo

Los parámetros a determinar durante el ensayo son la deformación circunferencia, es decir, a lo largo del perímetro que la denominaremos ϵ_H , y la deformación vertical o axial, que simultáneamente se corresponden con la tensión vertical ($\epsilon_H; f_c$) y ($\epsilon_c; f_c$), para obtener dichas lecturas, se procede a colocar dos galgas:

- Galga horizontal; que medirá las deformaciones perimetrales o circunferenciales, que se suponen que son uniformes a lo largo de todo el perímetro de la probeta (πD).
- Galga vertical; para determinar la deformación unitaria vertical, es decir, a lo largo de la generatriz de la probeta cilíndrica (300 mm).

6.2.3. Experimentación y análisis

Convenientemente instrumentalizadas con las galgas pegadas la superficie del hormigón, y las caras superior e inferior de la probeta perfectamente planas para evitar distorsiones de contacto, se procedió a ensayar las dos probetas. Los resultados de la media obtenidos se muestran en la figura nº6-1.

Figura nº6-1. Representación ensayo probetas. Colocación de instrumentación para ensayo

A continuación, se describe el comportamiento que tuvo la probeta de hormigón durante la ejecución del ensayo. En la que se pueden distinguir dos fases en la evolución de la tensión vertical frente a la deformación vertical.

Rama elástica, el punto $(\epsilon_c; f_c)$ evoluciona de forma perfectamente lineal hasta el valor de $f_c = 10 \frac{N}{mm^2}$. Similarmente, el punto $(\epsilon_H; f_c)$ evoluciona de forma lineal superando ligeramente la tensión anterior. Es importante destacar qué, la deformación circunferencial es muy pequeña y que se mide sobre una longitud de 470 mm (longitud del perímetro). Esta observación pone de manifiesto que una camisa de refuerzo pasivo no entra en carga en esta fase, y si lo hace es de manera imperceptible.

Rama parabólica, el punto $(\epsilon_c; f_c)$, adquiere una forma ligeramente parabólica, esto es debido a la presencia de micro fisuras en el hormigón, mermando la capacidad de carga en la probeta de hormigón. El módulo de elasticidad deja de ser constante y prácticamente es puntual (en cada punto de la curva, es posible trazar una tangente).

Finalmente, la curvatura es más pronunciada hasta un punto máximo que se corresponde con una deformación unitaria vertical de $\epsilon_{CO} = 0,002$, a partir del cual el elemento colapsa. El

comportamiento de la deformación transversal, de manera similar, deja de ser lineal y su incremento es notable hasta la rotura. Los resultados fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} N_u &= 417 \text{ KN} && \text{Carga de rotura experimental} \\ N_e &= 186 \text{ KN} && \text{Carga elástica experimental} \end{aligned}$$

Comparando los resultados experimentales y teóricos, existe una discrepancia de 16 KN. Lo que supone un 3,9 % de incremento de la carga de rotura experimental respecto de la teórica. Es una discrepancia mínima lo que viene a verificar que el planteamiento teórico es el correcto. En la figura nº6-2 se puede apreciar el estado de la probeta de hormigón después del ensayo.

Figura n ° 6-2. Ensayo ejecutado en prensa. Carga de rotura

Carga elástica:

Como ya se dijo, esta rama elástica es la más importante, porque pretendemos ampliarla y con ello mejorar la capacidad portante de la pieza.

$$\begin{aligned} N_{e,Teórica} &= 0,0004E_{ck}A_c = 190 \text{ KN.} \\ N_e &= 186 \text{ KN} && \text{Carga elástica experimental} \end{aligned}$$

La discrepancia es de 4 KN, lo que supone un 2 % de superioridad de la carga elástica teórica respecto de la experimental. La coincidencia es prácticamente exacta, lo que representa un buen síntoma de cara a mejorar la rama elástica.

6.3. Probetas de hormigón con una capa de refuerzo pasivo

6.3.1. Estudio teórico

El comportamiento tensional de un elemento de hormigón cilíndrico reforzado a confinamiento con una camisa de tejido de fibra de carbono impregnada y pegada con resina epoxídica, sometida a una carga centrada normal, se puede resumir en la siguiente figura nº6-3 del diagrama de cuerpo libre.

Figura nº6-3. Representación comportamiento tensional reforzado tejido-resina epoxídica

Donde:

f_L = tensión de confinamiento genérico

f_c = Tensión axial genérica

$$f_{CFRP} = E_{CFRP} \epsilon_H = \text{Tensión circunferencial} \quad [6.5]$$

E_{CFRP} = Módulo de elasticidad del compuesto tejido – resina

t = Espesor del compuesto tejido – resina

D = Diámetro de de la sección transversal

$$E_L = \frac{2E_{CFRP}t}{D} = \text{Módulo de confinamiento} \quad [6.6]$$

En el capítulo 2 de la presente tesis se describieron los modelos de comportamiento tensión–deformación de pilares reforzados por confinamiento mediante investigaciones teóricas y experimentales efectuadas por distintos autores. En este apartado se determinarán, de manera teórica, los valores de carga de rotura y carga elástica. Es importante resaltar los siguientes aspectos:

- 1.- La carga axial es soportada única y exclusivamente por el núcleo de hormigón, generando así la tensión axial (f_c) (L. Lam and J.G. Teng, 2009), (L. Lam and J.G. Teng, 2004) (L. Lam and J.G. Teng, 2003) y (T. Ozbakkaloglu and J.C. Lim , 2008).
- 2.- El refuerzo (compuesto tejido de fibra de carbono-resina epoxi), es sometido a esfuerzo única y exclusivamente de tracción, de forma circunferencial y uniforme, en una longitud igual al desarrollo πD .
- 3.- La longitud del solape debe ser de tal manera que no exista desplazamiento relativo entre las dos capas de refuerzo. El solape mínimo recomendado es de 200 mm.
- 4.- La deformación en la superficie de contacto refuerzo-hormigón es la misma, y por lo tanto, no existe desplazamiento relativo, lo cual implica la ausencia de tensiones rasantes.
- 5.- El refuerzo entra en tensión únicamente si existe deformación transversal del hormigón.

6.3.1.1 Tensión de confinamiento

A continuación, se desarrolla matemáticamente la tensión de confinamiento:

Donde:

$$f_L = \frac{2E_{CFRP}\epsilon_H t}{D} \quad \text{Tensión de confinamiento genérico} \quad [6.7]$$

$$f_{LU} = \frac{2f_{CFRP}}{D} t = 6,77 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión de confinamiento última} \quad [6.8]$$

$$f_{CFRP} = 600 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Determinado experimentalmente}$$

6.3.2. Refuerzo pasivo con una capa de tejido de fibra de carbono

6.3.2.1. Análisis teórico

Se exponen los cálculos realizados sobre la tensión de confinamiento último y tensión axial máxima, teniendo en cuenta las diferentes normativas e investigadores de prestigio en la materia.

➤ **Según (ACI 440.2R-08, 2008)**

$$f_{Lu} = \frac{2 \cdot 0,55 f_{CFRPt}}{D} = 4,67 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión de confinamiento ultimo} \quad [6.9]$$

$$f_{cc} = f_{co} + 3,135 f_L = 37,7 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión axial máxima} \quad [6.10]$$

Donde:

$$f_{co} = \text{tensión característica del hormigón}$$

$(\epsilon_{cc}; f_{cc})$, representa el punto final de rotura de la pieza reforzada, en el proceso de carga gradual hasta el colapso.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1,5 + 12 \frac{f_L}{f_{co}} \left(\frac{\epsilon_{ult}}{\epsilon_{co}} \right)^{0,45} \right] = 0,0045 \quad [6.11]$$

El coeficiente de 0,55, corresponde con la restricción de Lam y Teng. Según la cual la tensión de tracción simple en prensa es superior a la tensión en tracción perimetral a lo largo del desarrollo (πD). Este ensayo se describió en el anterior capítulo, cuyo proceso de ejecución fue novedoso por el hecho de obligar a que la rotura del talón se sitúe en el punto central. Con lo cual, la carga de rotura es:

$$N_{u.Ultimo} = 664 \text{ KN}$$

➤ **Según (CNR-DT200_R1, 2013)**

$$f_{Lu} = \frac{2 E_{CFRP} \epsilon_{CFRPt}}{D} = 2,3 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión de confinamiento ultimo} \quad [6.12]$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2,6 \left(\frac{f_{Lu}}{f_{co}} \right)^{0,67} \right] = 35 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión axial máxima} \quad [6.13]$$

$$\epsilon_{cc} = 0,0035 + 0,015 \sqrt{\frac{f_{Lu}}{f_{co}}} = 0,0075 \quad \text{Máxima deformación axial} \quad [6.14]$$

Donde:

$$f_{Lu} \text{ es la tensión de confinamiento con } \epsilon_U = 0,004$$

Restricción impuesta a la deformación unitaria para compensar la tensión de rotura por tracción simple y la tensión de tracción circunferencial. Con lo cual la carga de rotura corresponde a:

$$N_{u.Ultimo} = 617 \text{ KN carga última}$$

➤ Según (Concrete Society TR55 , 2012)

$$\rho_k = \frac{2E_{CFRP}t}{(f_{co}/\varepsilon_{co})_D} = 0,005 \quad [6.15]$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 5,25(\rho_k - 0,01) \frac{\varepsilon_{CFRP}}{\varepsilon_{co}} \right] = 38 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión máxima axial} \quad [6.16]$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} (1,75 + 6,5\rho_k^{0,8}) = 0,0046 \quad [6.17]$$

Donde:

ρ_k : Módulo de rigidez

Finalmente:

$$N_{u.Ultimo} = 669 \text{ KN carga última}$$

Teóricamente, existe una concordancia aceptable entre las tres normas, una carga axial máxima en torno a los 600 KN, y una deformación unitaria axial final superior al cuatro por mil. En la figura n°6-5 se observa uno de los ensayos realizados en laboratorio.

Figura n ° 6-4- Ensayo ejecutado en prensa. Carga de rotura

6.3.3. Instrumentación y ensayo

Al igual que en el apartado 6.2.2 del presente capítulo, se realizar la misma sistemática en relación a la instrumentación y ensayo, con la única particularidad de que las galgas se colocan adecuadamente sobre la primera capa de tejido de fibra de carbono, tal y como se observa en la figura n°6-6.

Los parámetros a determinar durante el ensayo son la deformación circunferencia, es decir, a lo largo del perímetro que la denominaremos ε_H , y la deformación vertical o axial, que simultáneamente se corresponden con la tensión vertical ($\varepsilon_H; f_c$) y ($\varepsilon_c; f_c$), para obtener dichas lecturas, se procede a colocar dos galgas:

- Galga horizontal, que medirá las deformaciones perimetrales o circunferenciales, que se suponen que son uniformes a lo largo de todo el perímetro de la probeta (πD).
- Galga vertical, para determinar la deformación unitaria vertical, es decir, a lo largo de la generatriz de la probeta cilíndrica (300 mm).

6.3.4. Experimentación e interpretación

Convenientemente instrumentalizadas las probetas de hormigón del lote N° 2, los resultados se pueden resumir en la siguiente gráfica, que es la representación media del comportamiento tensional axial y perimetral del lote N°2.

Figura n ° 6-5- Representación ensayo probetas una capa de refuerzo pasivo.

Colocación de la instrumentación

Comportamiento axial: Existe una primera rama elástica que se prolonga hasta superar una deformación unitaria del uno por mil, a partir del cual inicia una transición tipo parabólica,

hasta llegar a una deformación unitaria axial cercana al dos por mil. Posteriormente, inicia una evolución elástica lineal hasta la rotura la que ocurre cuando la deformación unitaria axial supera el valor de cinco por mil. En resumen:

$$1^{\circ} \text{ rama elástica: } \varepsilon_{c \text{ elast}} = 0,0012$$

$$f_{c \text{ elast}} = 12,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [6.18]$$

$$N_{\text{elast}} = 220 \text{ KN}$$

$$\varepsilon_{u \text{ axial}} = 0,0058 \quad \text{Deformación unitaria axial de rotura}$$

$$N_{u \text{ rot}} = 670 \text{ KN} \quad \text{Carga axial de rotura}$$

Valores prácticamente coincidentes con los teóricos, especialmente, el determinado mediante las ecuaciones de (ACI 440.2R-17, 2008). La rama elástica se prolonga, pero sin incrementar el ángulo que define el módulo de elasticidad inicial del hormigón. El propósito es prolongar precisamente esta rama, cosa que se consigue con el refuerzo pasivo de CFRP, pero si simultáneamente incrementamos el módulo de elasticidad, entonces mejoramos la capacidad portante de la pieza, y esto se consigue introduciendo una tensión inicial al tejido de refuerzo.

Comportamiento transversal (circunferencial)

El comportamiento de las deformaciones perimetrales es muy escaso siendo casi nulas hasta superar la tensión axial elástica, y por lo tanto, esta es la zona en la que se debe influir para mejorar la capacidad portante del elemento pero de una manera segura y eficaz. A partir de éste punto la deformación circunferencial se incrementa notablemente tomando la curva un aspecto parabólico hasta el colapso.

La superposición de los resultados experimentales de los lotes n°1 y n°2 se muestran con sus valores medios en la siguiente figura n°6-6 de comparación de resultados.

Figura n°6-6. Comparativa entre lotes N°1 y N°2 con valores medios entre tensión-deformación

Se puede apreciar en la figura n°6-6, el notable incremento tanto de ductilidad como de capacidad portante de las probetas de hormigón reforzadas respecto a las sin refuerzo.

6.4. Probetas de hormigón con dos capas de refuerzo pasivo

6.4.1. Estudio teórico

Para poder ejecutar un buen estudio teórico inicial sobre el comportamiento mecánico de una probeta de hormigón aplicándole dos capas de tejido de fibra de carbono impregnada de resina epoxídica, existe un factor fundamental que es la resistencia que presenta la propia tracción de los tejidos de fibra de carbono, y cuya impregnación se realiza con la resina epoxídica. Todas las características de ambos están desarrolladas en el capítulo 5.

6.4.1.1. Tensión de confinamiento

A continuación, se desarrolla matemáticamente la tensión de confinamiento. En este caso son validas las misma expresiones con la diferencia del espesor que provocado por las dos capas de tejido de fibra de carbono junto con la resina epoxi, siendo éste de $t=1,2$ mm.

$$f_L = \frac{2E_{CFRP}\epsilon_H t}{D} \quad \text{Tensión de confinamiento genérico} \quad [6.19]$$

$$f_{LU} = \frac{2f_{CFRP}}{D} t = 9,6 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión de confinamiento última} \quad [6.20]$$

Donde: $f_{CFRP} = 600 \frac{N}{mm^2}$ Determinado experimentalmente

6.4.2. Refuerzo pasivo con dos capas de tejido de fibra de carbono

6.4.2.1. Análisis teórico

Se exponen los cálculos realizados sobre la tensión de confinamiento último y tensión axial máxima, teniendo en cuenta las diferentes normativas e investigadores de prestigio en la materia.

➤ Según (ACI 440.2R-08, 2008)

$$f_{Lu} = \frac{2*0,55f_{CFRP}t}{D} = 6,8 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión de confinamiento ultimo} \quad [6.21]$$

$$f_{cc} = f_{co} + 3,135f_L = 44,1 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión axial} \quad [6.22]$$

Donde:

f_{co} = tensión característica del hormigón

$(\epsilon_{cc}; f_{cc})$, representa el punto final de rotura de la pieza reforzada, en el proceso de carga gradual hasta el colapso.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1,5 + 12 \frac{f_L}{f_{co}} \left(\frac{\epsilon_{ult}}{\epsilon_{co}} \right)^{0,45} \right] = 0,008 \quad [6.23]$$

El coeficiente de 0,55, se corresponde con la restricción de Lam y Teng. Según la cual la tensión de tracción simple en prensa es superior a la tensión en tracción perimetral a lo largo del desarrollo (πD) . Con lo cual la carga de rotura es:

$$N_{u,ultimo} = 781 \text{ KN}$$

➤ Según (CNR-DT200_R1, 2013)

$$f_{Lu} = \frac{2E_{CFRP}\epsilon_{CFRPt}}{D} = 3,7 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión de confinamiento ultimo} \quad [6.24]$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2,6 \left(\frac{f_{Lu}}{f_{co}} \right)^{0,67} \right] = 42 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión axial máxima} \quad [6.25]$$

$$\epsilon_{cc} = 0,0035 + 0,015 \sqrt{\frac{f_{Lu}}{f_{co}}} = 0,009 \quad \text{Máxima deformación axial} \quad [6.26]$$

Donde:

$$f_{Lu} \text{ es la tensión de confinamiento con } \epsilon_U = 0,004$$

Restricción impuesta a la deformación unitaria para compensar la tensión de rotura por tracción simple y la tensión de tracción circunferencial. Con lo cual, la carga de rotura es:

$$N_{u,ultimo} = 760 \text{ KN carga última}$$

➤ Según (Concrete Society TR55 , 2012)

$$\rho_k = \frac{2E_{CFRPt}}{(f_{co}/\epsilon_{co})D} = 0,08 \quad [6.27]$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 5,25(\rho_k - 0,01) \frac{\epsilon_{CFRP}}{\epsilon_{co}} \right] = 47,8 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Tensión máxima axial} \quad [6.28]$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1,75 + 6,5\rho_k^{0,8}) = 0,0056 \quad [6.29]$$

Donde:

ρ_k : Módulo de rigidez

Finalmente

:

$$N_{u,ultimo} = 840 \text{ KN carga última}$$

Teóricamente, existe una concordancia aceptable entre las tres normas, una carga de axial máxima en torno a los 800 KN, y una deformación unitaria axial final superior al seis por mil.

6.4.3. Instrumentación y ensayo

Al igual que en el apartado 6.3.3 del presente capítulo se realizará la misma sistemática de instrumentación y ensayo, con la única particularidad de que las galgas se colocan adecuadamente sobre la segunda capa de tejido de fibra de carbono.

Los parámetros a determinar durante el ensayo son la deformación circunferencial, es decir, a lo largo del perímetro que la denominaremos ε_H , y la deformación vertical o axial, que simultáneamente se corresponden con la tensión vertical ($\varepsilon_H; f_c$) y ($\varepsilon_c; f_c$), para obtener dichas lecturas, se procede a colocar dos galgas:

- Galga horizontal, que medirá las deformaciones perimetrales o circunferenciales, que se suponen que son uniformes a lo largo de todo el perímetro de la probeta (πD).
- Galga vertical, para determinar la deformación unitaria vertical, es decir, a lo largo de la generatriz de la probeta cilíndrica (300 mm).

6.4.4. Experimentación

Lo mismo que con las probetas reforzadas con una capa de tejido, se procedió a ensayar el lote N°3. Convenientemente instrumentalizadas (figura n°6-7) las probetas muestran el comportamiento medio tensional según la figura n°6-7.

Figura n°6-7. Representación ensayo probetas dos capas de refuerzo pasivo. Instrumentación

Se advierte que el módulo de elasticidad inicial apenas cambia respecto del lote N°1, pero se prolonga, llegando cerca del $\varepsilon_c = 0,002$. Se puede distinguir tres ramas en la evolución de la curva ($\varepsilon_c; f_c$).

- La primera rama siendo elástica lineal que supera prácticamente la deformación axial $\varepsilon_c = 0,001$.
- Por otro lado, la segunda rama parabólica de transición que enlaza la dos rectas. En esta zona el hormigón empieza a fisurar por efecto de la deformación y por lo tanto su comportamiento deja de ser lineal e influye en el comportamiento global.
- Por último, la rama elástica final la deformación unitaria axial ha superado el valor de $\varepsilon_c = 0,002$ lo que quiere decir que el hormigón ya está totalmente fisurado y no aporta ninguna rigidez al conjunto. En esta situación el protagonista de la capacidad resistente es la chaqueta refuerzo, cuyo comportamiento es lineal hasta la rotura

En la tabla n°6-1 se puede distinguir tres ramas en la evolución de la curva ($\varepsilon_c; f_c$). Dicha tabla arroja una valiosa información relacionando la carga con los tres modelos normativos, obteniendo unos valores experimentales.

Tabla n°6-1. Representación de resultados experimentales de carga

Lote	Carga	ACI KN	CNT KN	Lan y Teng KN	Experimental KN
N°1	Elástica	-	-	-	190
	Rotura	-	-	-	417
N° 2	Elástica	260	260	260	220
	Rotura	664	617	669	670
N° 3	Elástica	280	280	280	290
	Rotura	781	760	840	844

Tabla n°6-2. Representación de resultados experimentales de tensión.

Lote	Tensión	ACI N/mm ²	CNT N/mm ²	Lan y Teng N/mm ²	Experimental N/mm ²
N°1	Elástica	-	-	-	10,75
	Rotura	-	-	-	23,61
N° 2	Elástica	14,71	14,71	14,71	12,45
	Rotura	37,58	34,92	37,86	37,92
N° 3	Elástica	15,85	15,85	15,85	16,41
	Rotura	44,20	43,01	47,54	47,76

6.5. probetas de hormigón reforzadas a confinamiento activo (lote N°4)

6.5.1. Estudio teórico

Con los resultados anteriores se aprecia qué, la incorporación del tejido de refuerzo no tiene mayor incidencia en cuanto se refiere al módulo de elasticidad inicial (E_c), sin embargo, la deformación unitaria elástica supera el valor de $\varepsilon_c = 0,0007$ sin incrementar sustancialmente la tensión axial, por lo tanto, se plantea una segunda fase experimental, para mejorar el módulo de elasticidad inicial.

Para ello, se diseñó un método para introducir una fuerza de 135 Newton a manera de confinamiento activo, incorporando así mayor rigidez y mejorando el módulo de elasticidad inicial de la probeta de hormigón para que el refuerzo participe desde el primer instante en que el conjunto es sometido a compresión axial. En la figura n°6-8 se puede apreciar una simulación de diseño para la incorporación de tensión inicial al refuerzo.

Figura n° 6-8- Diseño para incorporar tensión inicial en la capa de refuerzo

La tensión inicial (σ_i) que se introduce es perfectamente uniforme por la acción de tres pesos colocados de forma simétrica en el extremo del tejido. Mediante este proceso se logra adherir el tejido a la superficie del hormigón con la mencionada tensión inicial.

$$\sigma_i = \frac{\sum F}{\text{Sección transversal del tejido}} = 2,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

6.5.2. Instrumentación y ensayo

El parámetro más importante en esta fase de trabajo es el módulo de elasticidad, para ello, se sometieron al ensayo correspondiente para determinar el módulo de elasticidad del lote N° 4. Los resultados convenientes tratados fueron los siguientes:

$$E_{ci} = 27100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Media del módulo de elasticidad del lote N° 1}$$

$$E_{ci} = 30500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Media del módulo de elasticidad del lote N° 4}$$

En la figura n°6-9, se puede apreciar la preparación para el debido ensayo del módulo de elasticidad.

Figura n°6-9 Ensayo de módulo de elasticidad realizado

6.5.3. Discusión teórica

El modelo propuesto (L. Lam and J.G. Teng, 2009) y (L. Lam and J.G. Teng, 2004) (figura n°6-10), es en el que se adoptan muchas normas nacionales de la edificación. También se tuvo en

cuenta la teoría deducida del modelo propuesto por Lam y Teng (B.Y.X. and H.W. Wu, 2000), (T. Jiang and J.G. Teng, 2012), y (Y. Wu and L. Wang, 1994).

Figura n°6-10 Proposed stress–strain model for FRP-confined concrete

En dicha figura n°6-10, se pueden observar dos ramas claramente diferenciadas: la que va del origen de coordenadas (módulo de elasticidad inicial del hormigón E_c), hasta el punto $(\epsilon_{co}; f_{co})$ en el que, f_{co} se incrementa debido al efecto del refuerzo, esta es una rama ligeramente parabólica. A partir de ese punto se inicia la rama perfectamente elástica donde el hormigón es sólo un elemento de relleno, y el protagonista es el tejido de refuerzo. E_c representa el módulo de elasticidad del hormigón sin confinar, o lo que es lo mismo, la pendiente de la recta tangente correspondiente a la rama inicial de la gráfica. Si se incrementa la pendiente de la recta en este primer tramo, es decir, si se incrementa el módulo de elasticidad, se mejora la capacidad portante de la probeta de hormigón.

Basándonos en la experimentación realizada y los resultados obtenidos, podemos afirmar de manera conservadora que el comportamiento es perfectamente elástico, el intervalo de deformación (ϵ) $[0,0 - 0,0007]$. Lo cual nos permite apreciar tres ramas perfectamente diferenciadas (Figura n°6-10):

1.- Rama elástica inicial; claramente influenciada por el módulo de elasticidad inicial del hormigón (E_c) hasta aproximadamente el $0,45f_{co}$. En esta zona el tejido de refuerzo carece de importancia, debido a la nula o escasa deformación transversal del elemento.

2.- Rama elastoparábólica; es una transición lineal parabólica, en la que interactúan los dos materiales, el hormigón en su fase plástica y el tejido de refuerzo con un comportamiento perfectamente elástico, hasta el punto de fragmentación del hormigón $\varepsilon_{c0} = 0,002$.

3.- Rama elástica final, en la que el hormigón deja de tener protagonismo y es simplemente un material de relleno. Aquí, el módulo de elasticidad (E_2), efectivamente disminuye y se corresponde íntegramente con el tejido de refuerzo. El colapso de la probeta de hormigón ocurre en torno a una deformación axial de $\varepsilon_{cu} \sim 0,01$. La diferencia entre ε_{c0} y ε_{cu} , se puede considerar como un incremento de la ductilidad estructural.

Todos los elementos estructurales y en particular los pilares, están sometidos a factores de seguridad, tanto al reducir su capacidad de carga ($\phi = 0,7$) como al incrementar la acción sobre él ($F = 1,5$), que garantizan su actividad resistente dentro de una zona de seguridad, que se corresponde con la zona elástica inicial anteriormente mencionada. Salir de esta zona implica deformaciones plásticas y la aparición de fisuras que no son compatibles con la seguridad estructural.

Las expresiones que gobiernan el comportamiento tensión-deformación de un elemento estructural cilíndrico confinado son las siguientes:

$$f_L = \frac{2E_{CF}\varepsilon_{CF}t}{D} \quad \text{tensión de confinamiento final}$$

$$f_{cc} = f_{c0} + 3,3f_l \quad \text{tensión máxima axial final}$$

$$\rho_k = \frac{2E_{CF}\varepsilon_{c0}t}{f_{c0}D} \quad \text{Rigidez de confinamiento}$$

$$\rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{CF}}{\varepsilon_{c0}} \quad \text{Relación de deformación}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} [1,75 + 12\rho_k\rho_\varepsilon^{1,45}] \quad \text{Deformación axial final}$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{c0}}{\varepsilon_{cc}} \quad \text{Módulo de elasticidad tramo final}$$

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_{c0}} \varepsilon_c^2, & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \\ f_{c0} + E_2 \varepsilon_c, & \varepsilon_t < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \end{cases} \Rightarrow \text{Ecuación curva tensión-deformación}$$

Las rectas:

$$f_c = f_{co} + E_2 \varepsilon_c$$

$$f_c = E_{ci} \varepsilon_c$$

En la que E_{ci} es el módulo de elasticidad inicial, válido hasta $\varepsilon_c = 0,0007$. Es posible en lazar mediante una parábola con la condición de que sea simultáneamente tangente a las dos rectas.

Por lo tanto, el planteamiento que realizamos es reforzar la probeta de hormigón sin salir de la zona elástica inicial, es decir, deformación (ε_c) comprendida en el intervalo $[0,000 - 0,0007]$. Para ello, la única posibilidad que cabe es introducir una tensión inicial al tejido de refuerzo que contribuya a incrementar el módulo de elasticidad inicial, lo que repercute en un aumento de la tensión de trabajo del elemento para la misma deformación axial, ya que los elementos estructurales de hormigón armado tienen un comportamiento ligeramente micro fisurado.

6.5.4. Resultado y discusión con probetas con refuerzo pasivo y activo

En las gráficas siguientes se muestran la comparativas de los resultados entre el lote N°1 y el lote N° 4.

Figura nº 6-11. Comparación módulos de elasticidad obtenidos para cada una de las probetas analizadas

Se observa claramente un notable incremento del valor del módulo de elasticidad inicial del lote N° 4, respecto del lote N° 1. Tomando en cuenta los valores medios se tiene:

$$\Delta E = 3400 \frac{N}{mm^2}$$

Este incremento representa aproximadamente el 12% respecto al lote N° 1, lo que debe repercutir de forma lineal a las tensiones axiales de los elementos sometidos a carga de compresión centrada. En la siguiente gráfica se muestra dicha comparativa.

Figura n° 6-12. Comparativa de módulos de elasticidad

Dados los resultados obtenidos, se pueden apreciar los siguientes hechos:

Para valores ε_c que $\in$ al $[0,000 - 0,0007]$ se dijo, de manera muy conservadora que el comportamiento tensional es perfectamente elástico, con lo cual la diferencia de tensiones en $\varepsilon_c = 0,0007$ es:

$$f_c = 18,97 \frac{N}{mm^2} \quad \text{tensión axial lote N°1}$$

$$f_{ci} = 21,35 \frac{N}{mm^2} \quad \text{tensión axial lote N°4}$$

$$\Delta f_c = 2,38 \frac{N}{mm^1} \quad \text{incremento de tensión axial}$$

$$\Delta N = 43 \text{ KN} \quad \text{Incremento de carga axial}$$

Introduciendo una tensión inicial uniforme de $\sigma_i = 2,7 N/mm^2$ en el tejido provocamos la aparición de una tensión de confinamiento inicial de $f_{Li} = 0,006 N/mm^2$, rigidizando el conjunto con un incremento del módulo de elasticidad inicial de $\Delta E_c = 3400 \frac{N}{mm^2}$, es decir, aproximadamente un 12%. La tensión axial también se incrementa, para una deformación de $\varepsilon_c = 0,0007$ el aumento es $\Delta f_c = 2,38 \frac{N}{mm^2}$.

El resultado de las probetas de hormigón con una capa de refuerzo activo obtuvo un valor en relación al modulo de elasticidad y coeficiente de poisson que fue el siguiente:

$$E_c = 30.500 \frac{N}{mm^2} \quad \mu = 0,168$$

A medida que se incrementa la tensión axial se va incrementando de manera proporcional la de deformación axial.

Por otra parte, a la vista de los resultados, y teniendo en cuenta el modelo de comportamiento tensión-deformación propuesto por (L. Lam and J.G. Teng, 2003), (L. Lam and J.G. Teng, 2004) y (L. Lam and J.G. Teng, 2009) (figura nº6-10), se propone un nuevo modelo de comportamiento con tres ramas:

- Una primera rama perfectamente elástica, acorde con los resultados obtenidos en los ensayos realizados, hasta una deformación $\varepsilon_c = 0,0007$.
- La segunda rama; de transición que sirve para enlazar la primera recta de comportamiento elástico (coeficiente angular E_c) con la segunda recta también de comportamiento elástico (coeficiente angular E_2). En la figura nº6-13 se muestra en color verde la parábola. A la vista de los resultados, y teniendo en cuenta el modelo de comportamiento tensión-deformación que propone (L. Lam and J.G. Teng, 2009) y (L. Lam and J.G. Teng, 2003), se plantea un nuevo modelo de comportamiento con las tres ramas anteriormente mencionadas que difiere del modelo (L. Lam and J.G. Teng, 2009) y (L. Lam and J.G. Teng, 2003) en la primera rama elástica.

Para la segunda rama adoptamos la expresión parabólica de (L. Lam and J.G. Teng, 2009) y (L. Lam and J.G. Teng, 2003) en la que incorporamos (E_{ci}).

- Por último, un tercer tramo que coincide con el propuesto por (L. Lam and J.G. Teng, 2009) y (L. Lam and J.G. Teng, 2003).

Finalmente, superponiendo la recta de comportamiento elástico inicial que sugerimos, y la recta de (L. Lam and J.G. Teng, 2009) y (L. Lam and J.G. Teng, 2003) con el comportamiento experimental del lote N° 2, se obtiene la figura n°6-13 de comportamiento tensional.

Figura n° 6-13. Comportamiento tensional

Se puede observar que la curva tiene que ser continua y derivable en todo el dominio para garantizar la existencia de un módulo de elasticidad, además, muestra un encaje perfecto entre el planteamiento teórico y experimenta de manera que se plantea el siguiente comportamiento tensión-deformación mediante la siguiente expresión:

$$f_c = \begin{cases} E_{ci} \cdot \varepsilon_c & 0 < \varepsilon_c < 0,0007 \\ E_{ci}\varepsilon_c - \frac{(E_{ci}-E_2)^2}{4f_{c0}} & 0,0007 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \\ f_{c0} + E_2\varepsilon_c & \varepsilon_t < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \end{cases} \quad [6.36]$$

Los resultados ponen de manifiesto que el refuerzo pasivo no genera prácticamente ningún incremento de tensión en la zona elástica, y si adquiere protagonismo cuando la deformación es significativa, es decir, para deformaciones superiores a $\varepsilon_c = 0,0007$. El modelo bilineal planteado por algunos autores no es posible, porque en el punto de intersección no es posible trazar una tangente.

CAPÍTULO 7

Conclusiones

7.1. Introducción

En la presente tesis se abordó con gran interés el propio estado del arte vinculado al refuerzo de pilares a través de la técnica del confinamiento de materiales compuestos (CFRP). Además, se presenta un amplio estudio experimental llevado a cabo de manera propia, siguiendo normas internacionales, recomendaciones de otros investigadores de renombre en la materia y obteniendo una expresión matemática que refleja el comportamiento tensión-deformación. A continuación, se presentarán las conclusiones más relevantes, y el planteamiento de futuras líneas de investigación relacionadas con la presente tesis.

7.2. Conclusiones experimentales

Dentro del programa experimental se puede indicar que el desarrollo experimental fue realizado en varias fases, y cuyos resultados pueden ser revisados en los capítulos 3, 4 y 5. Dichas fases corresponden con:

- En la primera fase se realizaron ensayos a compresión de 15 probetas de hormigón normalizadas de sección circular de 300x150 mm (en adelante, probetas de hormigón)

que fueron divididas por lotes. El lote N°1 corresponde a 5 probetas de hormigón sin refuerzo que sirvieron de testigo, el lote N°2 corresponde a 5 probetas de hormigón con refuerzo de una capa de CFRP en confinamiento pasivo, y un lote N°3 corresponde a 5 probetas de hormigón con refuerzo con dos capas de CFRP en confinamiento pasivo. Con todo ello, se realiza una comparación experimental entre los lotes N°1 y N°2.

- La segunda fase está vinculada al lote N°4 que corresponde a 5 probetas de hormigón reforzadas con una capa de refuerzo en confinamiento activo. Se realizó un estudio exhaustivo del cálculo del módulo de elasticidad, y se realizó comparativa entre los lotes N°1 y N°4.

A continuación, se exponen las conclusiones más relevantes de los resultados obtenidos en el plan de experimentación, siendo estas:

- La introducción de pretensión en las fibras de refuerzo supone un avance desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, ya que se alarga la vida de la estructura.
- El uso del compuesto de tejidos de fibra de carbono junto con la resina epoxídica, es decir, lo que se conoce por compuesto, supone la prolongación del comportamiento elástico de las probetas de hormigón. Se consigue una prolongación de la deformación axial pasando del 0,002 al 0,006 entre las probetas de hormigón sin refuerzo en relación con las probetas de hormigón reforzadas. Esto proporciona mayor ductilidad y resistencia de las estructuras.
- La introducción de una tensión inicial en el refuerzo aplicando la técnica de confinamiento activo mejora sustancialmente el comportamiento mecánico de las probetas de hormigón, y se aprovecha más eficazmente las características del material de refuerzo. Al introducir una fuerza perimetral externa de 135 Newton en el lote N°4, las probetas de hormigón consiguen incrementar el coeficiente angular prolongando el comportamiento perfectamente elástico hasta $E = 0,0007$. Lo que repercute en una mayor capacidad portante.

- La introducción de una tensión inicial de $3,43 \text{ N/mm}^2$ en el tejido de refuerzo supone un incremento del módulo de elasticidad inicial de $\Delta E = 3400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

7.3. Conclusiones experimentales sobre la comparación de modelos

Se realizaron comparativa de modelos de cálculo entre diferentes autores y normativas (ACI 440.2R-08, 2008), (CNR-DT200_R1, 2013) y (Concrete Society TR55 , 2012).

- Es notable el incremento tanto de ductilidad como de capacidad portante de las probetas de hormigón reforzadas lote N°2 respecto a las probetas de hormigón sin refuerzo lote N°1. De igual modo, en el lote N°4, las probetas de hormigón con refuerzo activo consiguen incrementar notablemente el módulo de elasticidad mejorando el coeficiente angular, y por lo tanto, la tensión axial con las probetas de hormigón del lote N°1 sin refuerzo.

Los resultados convenientemente tratados fueron de $E_{ci}=27.100 \text{ N/mm}^2$ (media del módulo de elasticidad del lote N°1) y $E_{ci}=30.500 \text{ N/mm}^2$ (media del módulo de elasticidad del lote N°4).

- El módulo de elasticidad se incrementa para las probetas de hormigón confinadas lote N°4 con refuerzo activo en aproximadamente un 12 % frente a las probetas de hormigón sin refuerzo lote N°1.
- En las probetas de hormigón con una capa de refuerzo (confinamiento pasivo) existe una concordancia aceptable entre las tres normas, una carga axial máxima en el torno a los 600 KN, y una deformación unitaria axial final superior al cuatro por mil.
- En las probetas de hormigón con una capa de refuerzo activo, la zona principal que va desde el origen de coordenadas (módulo de elasticidad inicial del hormigón (E_c), hasta el punto $(\varepsilon_{co}; f_{co})$ en el que f_{co} se incrementa debido al efecto del refuerzo, esta es una rama ligeramente parabólica. A partir de ese punto se inicia la rama perfectamente

elástica donde el hormigón es sólo un elemento de relleno sin trabajar, y el protagonista es el tejido de refuerzo hasta llegar a colapsar.

Podemos afirmar de manera experimental y conservadora que el comportamiento es perfectamente elástico en el intervalo de deformación (ϵ) $[0,0 - 0,0007]$. Lo cual nos permite apreciar tres ramas perfectamente diferenciadas, siendo estas:

- o 1.- Rama elástica inicial; claramente influenciada por el módulo de elasticidad inicial del hormigón (E_c) hasta aproximadamente el $0,45f_{c0}$. En esta zona el tejido de refuerzo carece de importancia, debido a la nula o escasa deformación transversal del elemento.
 - o 2.- Rama elastoparábolica; es una transición lineal parabólica, en la que interactúan los dos materiales, el hormigón en su fase plástica y el tejido de refuerzo con un comportamiento perfectamente elástico, hasta el punto de fragmentación del hormigón $\epsilon_{c0} = 0,002$.
 - o 3.- Rama elástica final, en la que el hormigón deja de tener protagonismo y es simplemente un material de relleno. Aquí, el módulo de elasticidad (E_2), efectivamente disminuye y se corresponde íntegramente con el tejido de refuerzo. El colapso de la probeta de hormigón ocurre en el entorno a una deformación axial de $\epsilon_{cu} \sim 0,01$. La diferencia entre ϵ_{c0} y ϵ_{cu} , se puede considerar como un incremento de la ductilidad estructural.
- El comportamiento tensión-deformación propuesto se refleja en la siguiente expresión matemática desarrollada en base a los resultados obtenidos:

$$f_c = \begin{cases} E_{ci} \cdot \epsilon_c & 0 < \epsilon_c < 0,0007 \\ E_{ci}\epsilon_c - \frac{(E_{ci}-E_2)^2}{4f_{c0}} & 0,0007 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t \\ f_{c0} + E_2\epsilon_c & \epsilon_t < \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \end{cases}$$

Los resultados ponen de manifiesto que el refuerzo pasivo no genera prácticamente ningún incremento de tensión en la zona elástica, y si adquiere protagonismo cuando la deformación es significativa, es decir, para deformaciones superiores a $\epsilon_c = 0,0007$.

- El modelo bilineal planteado por algunos autores no es posible porque en el punto de intersección, no es posible trazar una tangente.

7.4. Líneas futuras de investigación

Todos los estudios y trabajos realizados en la presente tesis doctoral indican que aún queda recorrido en el campo de la investigación vinculante al refuerzo de pilares de hormigón. En consecuencia, y basándonos en los resultados obtenidos en la presente tesis se plantean las siguientes líneas futuras de investigación:

- Profundizar más en el estudio experimental de la mejora del módulo de elasticidad, ya que de conseguir mejorar dicho módulo mejoraría la capacidad resistente estructural. Para ello, es necesario incrementar más la tensión inicial de confinamiento para aumentar la rigidez, y por lo tanto, el módulo de elasticidad, a fin de que la primera rama planteada elástica dote a la pieza de un notable incremento en la capacidad portante del pilar.
- La mejor experimentación que se puede realizar es en un modelo de tamaño real de pilares de hormigón, pero también se debería emplear modelos reducidos de pilares de hormigón armado para tener en cuenta el efecto de la esbeltez, y posibles momentos flectores.

A la vista de estas líneas de investigación se deduce que aún queda un amplio recorrido de investigación en este sentido.

CAPÍTULO 8

Bibliografía

8.1 Bibliografía

A.A.C.I. Standard, Fig. 21, 1981. Doi: 10.2748/tmj/1232376167.

ACI (American Concrete Institute). “Guide for design and construction of externally bonded FRP system for strengthening concrete structures”. ACI 440.2R-02. Michigan, 2002.

ACI committee 440, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, 1996.

ACI (American Concrete Institute).ACI 440.2R-08 Conmmittee 440.2008, y la ACI 440.2R-17.

AIRE, C. M. 2002. Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

Alarcón López, A. “Estudio teórico-experimental sobre la reparación y refuerzos de puentes de dovelas con fibra de carbono”. Departamento de Ingeniería de la Construcción de la E.T.S. de I.C.C.P. de Barcelona. U.P.B. 2002.

Alcaraz Álvarez de Perea, V. “Control ambiental en la producción de R.C.D. mediante el reforzamiento de pilares con tejidos de fibra de carbono”. U.P.M. 2013.

Alcaraz Carrillo de Albornoz, V. “Innovación en el refuerzo de estructuras de hormigón a flexión con soluciones NSM CFRP pretensado, para el control de RCD” E.T.S. del I. Industriales. U.P.M. 2011.

Alireza Saljoughian and Davood Mostofinejad, Corner Strip-Batten Technique for FRP-Confinement of Square RC Columns under Eccentric Loading, Compos. Constr. 20 (2016).

A. Parvin, W. Wang, Concrete columns confined by fiber composite wraps under combined axial and cyclic lateral loads, 58 (2002) 539–549.

Azadeh Parvin and Wei Wang, Behavior of FRP Jacketed Concrete Columns under Eccentric Loading, Compos. Constr. Constr. 5 (2001).

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C494/C494M-2017-07. Historical Standard: Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto.2017.

BINICI, B. 2005. An analytical model for stress–strain behavior of confined concrete. Engineering Structures, 27, 1040-1051.

Bresson: “Nouvelles recherches et applications concernant á l’utilisation des collages dans les structures. Beton Plaqué.” Annales de l’ ITBTP. Supplément au n° 278 Février 1972 Série BBA/116.

B.Y.X. and H.W. Wu, COMPRESSIVE BEHAVIOR OF CONCRETE CONFINED BY CARBON FIBER COMPOSITE JACKETS No Title, F Mater. Civ. Eng. 12 (2000) 139–146.

CEB. Consejo Superior de Investigaciones Científicas: “Corrosión y protección de materiales”. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. El boletín 162. 1989.

CNR-DT 200 (2004): “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures”. Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, National Research Council, Roma.

CNR-DT200_R1 2013. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Italy.

Chaallal, O., Hassan, M., and Shahawy, M. (2003). “Confinement model for axially loaded short rectangular columns strengthened with fiber-reinforced polymer wrapping.” *ACI Struct. J.*, 100(2):215-221.

Chaallal, Omar y Shahawy, Mohsen (2000): “Performance of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Reinforced Concrete Column under Combined Axial-Flexural Loading”. *ACI Structural Journal*, vol. 97, n° 4, pp. 659-668.

C. Puhersch, B. Kingsbury, Y. Lecun, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems, Structures*. 2 (2005) 2–6.

Cometec técnicas en hormigón, S.A.U.; “Refuerzos de estructuras.” *Refuerzo con hormigón y metálicos*. Catálogo de actividades de la Empresa. 2007.

C.P. del Hormigón, *Instrucción del hormigón estructural EHE-08*, (2011) 704.

Dante Espeche, A.; “Refuerzo de pilares con encamisado de hormigón solicitados a axil centrado”. *Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. E.T.S.de ICCP, de Madrid. U.P.M.* 2007.

De Diego Villalón, A.; Arteaga Iriarte, A; “Confinamiento con FRP de pilares de hormigón armado sometidos a compresión simple”. I. Torroja. CSIC. CEMCO XVII, 2007.

Demers, M. y Neale, K. W. (1999): “Confinement of reinforced concrete columns with fibre reinforced composite sheets an experimental study”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 26, pp. 226-241.

Drizoro S.A.U. DRIZORO REPLARK. “Sistema de reparación y refuerzo estructural con hojas de fibra de carbono”. *Boletín técnico nº 154*. 2013.

EB.: “Assessment of concrete structures and design procedures for up-grading (Re-design)”. *Task Group 12.- Bulletin 162.- Comité Euro-International du Béton.- Lausanne 1984*.

Fernández Cánovas, M.: “Refuerzo de elementos estructurales mediante encolado de bandas de acero con resinas epoxídicas.” *Cuadernos IETCC nº 382-383 Diciembre 1985*.

FIB Bulletin 14 (2001): “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”. *Task Group 9.3 FRP Reinforcement for Concrete Structures, Fédération Internationale du Béton, Lausanne*.

FIP.: “Repair and strengthening of concrete structures. Guide to good practice.” *London 1991*.

Frangou, M., Pilakoutas, K., and Dritsos, S.E. (1995). “Structural repair/strengthening of RC columns.” *Constr. and Building Mater.*, 9(5): 259-265.

F. Richart, A. Brandtzaeg, R.L. Brown, *A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses*, *Bulletin No. 26, Univ. Illinois Bull.* (1928) 1–104.

FAM, A. Z. & RIZKALLA, S. H. 2001. Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes, 98(4), 451-461. *ACI Structural Journal*, 98, 451-461.

GEHO y CEB.: “Reparación y refuerzo de estructuras de hormigón”. *Guía FIB de buena práctica . Estructuras y Edificación, ed., Vol 3. Colegio de ICCP. Madrid. 2008*.

González Valle, E.; “Refuerzo con resinas y chapas”. *Curso monográfico: Patología, rehabilitación y refuerzo de obras de hormigón armado*. INTEMAC, 1991.

Guoqiang Li, *Experimental study of FRP confined concrete cylinders*, *Eng. Struct.* 28 (2006) 1001–1008.

G. Wu, Z.T. Lü, Z.S. Wu, *Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites*, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 134-148.doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.022.

H. Baji, H. Reza, C. Li, *Probabilistic assessment of FRP-confined reinforced concrete columns*, 153 (2016) 851–865.

Harries, Kent A. y Kharel, Gayatri (2002): “Behavior and Modeling of Concrete Subject to Variable Confining Pressure”. *ACI Materials Journal*, vol. 99, n° 2, pp. 180-189.

Harries, K. A. & CAREY, S. A. 2003. *Shape and “gap” effects on the behavior of variably confined concrete*. *Cement and Concrete Research*, 33, 881-890.

Herrero, J.E.; Martínez Martínez, R.; et. al.; “Refuerzos de estructuras mediante fibra de carbono”. *Sesión monográfica n° 1. ACIES (Asociación de Consultores Independientes de Estructuras de Edificación)*. 2004.

Homayoun KhaliliMichael N. Fardis, *FRP-encased concrete as a structural material*, *Concr. Res.* 34 (1982) 191–202.

Jiménez Montoya, P.; García Meseguer, A.; et al.; “Hormigón armado”, 14ª Edición basada en la EHE, ajustada al código modelo y al Eurocódigo. Ed. Gustavo Gili, SA, Barcelona, 2000.

J.G. Teng, T. Jiang, L. Lam, Y.Z. Luo, *Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete*, *J. Compos. Constr.* (2009) 1–27. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000012.

Júlio, E.S., F. Franco, V.D. Silva; “Structural Rehabilitation of Columns with Reinforced Concret Jacketing”. *Progress in Structural Engineering and Materials*, JohnWiley & Sons. 2003.

Karbhari, V. y Gao, Y. (1997): “Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple design equations”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 9, nº 4, pp. 185-193.

L. Bisby, M. Ranger, *Axial – flexural interaction in circular FRP-confined reinforced concrete columns*, 24 (2010) 1672–1681. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.024.

L’Hermite: “Renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie par collage.” *Annales ITBTP* nº 529. 1994.

Ladner, Weber: “Concrete structures with bonded external reinforcement.” *EMPA Dübendorf, Zurich* nº 206. 1981.

L. Lam, J.G. Teng, *Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete*, *J. Compos. Constr.* 8 (2004) 539–548. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:6(539).

L. Lam, J.G. Teng, *Design-oriented stress – strain model for FRP-confined concrete*, 17 (2003) 471–489. doi:10.1016/S0950-0618(03)00045-X.

L. Lam, J.G. Teng, *Stress–strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression*, *Eng. Struct.* 31 (2009) 308–321. doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2008.08.014.

L. De Lorenzis, R. Tepfers, *Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites*, *J. Compos. Constr.* 7 (2003) 219–237. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:3(219).

León González, J. Et al.; “Refuerzo de elementos de hormigón estructural frente a esfuerzos de flexo-compresión (elementos tipo pilar) mediante elementos de hormigón y acero.” *ADIF. Unidad de mantenimiento de estructuras*. 2004.

León, J.; Espeche, A.; “Aplicación del micro HAC al refuerzo de pilares mediante encamisados.” *Grupo Hormigón Estructural. UPM*, 2013.

Lima, L. J.; “Avances en métodos de reparación de estructuras de hormigón”. Refuerzo de estructuras de hormigón. Asociación Argentina del Hormigón Estructural, 2007.

Luizaga Patiño, A.M.; “Comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado reforzadas con bandas encoladas con resinas epoxídicas”. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, UPM. 2005.

MARQUES, S., MARQUES, D., LINS DA SILVA, J. & CAVALCANTE, M. 2004. Model for Analysis of Short Columns of Concrete Confined by Fiber-Reinforced Polymer. *Journal of Composites for Construction*, 8, 332-340.

M. Breveglieri, J.A.O. Barros, G.M. Dalfré, A. Aprile, *Composites : Part B A parametric study on the effectiveness of the NSM technique for the flexural strengthening of continuous RC slabs*, *Compos. Part B*. 43 (2012) 1970–1987. doi:10.1016/j.compositesb.2012.02.008.

Maalej, M.; Goh W.H. and P. Paramasivam, P.; “Analysis and design of FRP externally-reinforced concrete beams against debonding-type failures” Singapore, 2001.

Mander, J. B., PRIESTLEY, M. J. N. & PARK, R. 1988. Theoretical Stress- Strain Model for Confined Concrete , 114(8), 1804-1826. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114, 1804-1826.

Marijn R. Spoelstra and Giorgio Monti, *FRP-Confined Concrete Model*, *Compos. Constr.* 3 (1999).

MATTHYS, S., TOUTANJI, H., AUDENAERT, K. & TAERWE , L. 2005. Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites. *ACI Structural Journal*, 102, 258-267.

Mier, Deuring, Meyer, Schwegler: “Strengthening of structures with CFRP laminates: research and applications in Switzerland. Advanced composite materials in bridges and structures” 1st international conference. Sherbrooke, Quebec, 1992.

Miravete, A. 2000. *Materiales Compuestos*. Primera edición.

Mirram Amir; Shahawy Mohsen, *Behavior of concrete columns confined by fiber composites.*, *ACI Struct. Eng.* 123 (1997).

Molins Borrell C., Serrá Martín, I.; “Aspectos fundamentales para el diseño de un refuerzo estructural”. U.P.C, Barcelona, 2004.

M.W.L. H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, *Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced With Fiber Composite Straps*No Title, *Struct. J.* 91 (1994) 434–447.

M.W.L. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, *Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced With Fiber Composite Straps*, *ACI Struct.* 91 (1994) 434–447.

NEWMAN, K. & NEWMAN, J. B. *Failure theories and design criteria for plain concrete. International Engineering Materials Conference on Struture, Solid Mechanics and Engineering Design*, 1969 Southampton. Wiley Interscience, New York, 963-995.

Pierre Rochette and Pierre Labossière, *Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites*, *Compos. Constr.* 4 (2000).

Perera, R.; “Refuerzo a flexión”. CEMCO XVII. *Refuerzo de estructuras de hormigón con materiales compuestos*, 2007.

Pérez Valcárcel, J.; “Reparación y refuerzo de Estructuras”, transparencias docentes. Departamento de Tecnología de la Construcción (Universidad de la Coruña), 2000.

Pertejo García, J.; “Refuerzo estructural con materiales compuestos de fibra de carbono”. *Innovaciones tecnológicas, SIKA*. 2011.

Pilakoutas, K. y Mortazavi, A. A. (1997): “Ductility through external confinement of RC members with FRP.” *Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, Japan Concrete Institute, Tokyo, 1, 225–232.

Priestley, N., et al.; “Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-part 1: theoretical consideration and test design”. *ACI Structural Journal*, 1994.

Romero Gago, F.; “Tecnología de estructuras de hormigón armado y pretensado, EHE 08”. Ed. Brandgroup. Madrid, 2008.

R.J. Pessiki S, Harries K, Kesstner J, Sause R, D Esign of R Einfoiced C Oncrete B Ridge C Olumns, 5 (2013) 237–245.

Restrepo, J.I., and Vino, B.D. (1996). “Enhancement of the axial load carrying capacity of reinforced concrete columns by means of fiber glass-epoxy jackets.” *Proc., 2nd. Int. Conf. On Adv. Compos. Mater. in Brid. Struct.*, 547-554, the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, Canada.

Salaverría, J. H.; Casas, J. R.; Ramos, G.; “Refuerzo a flexión de puentes mediante encolado de bandas flexibles de fibra de carbono. Verificación experimental” *Comunicaciones presentadas en las jornadas “Nuevas técnicas de evaluación estructural, rehabilitación y refuerzo de estructuras”*, organizadas por el grupo español del IABSE, Madrid, 1999.

M.Brace. “Sistema Integral para el Refuerzo de Estructuras”; hojas de fibras, laminados y resinas. *Guía de diseño*, 2007.

SPOELSTRA, M. & MONTI, G. 1999. FRP-Confined Concrete Model. *Journal of Composites for Construction*, 3, 143-150.

Schwegler: “Masonry construction strengthened with fiber composites in seismically endangered zones” 10th European conference on earthquake engineering, Vienna 1994.

Swamy, Jones.:”Composite behaviour of concrete beam with bounded external reinforced”. *International Journal of Cement Composited*. Mayo, 1980.

T. Ozbakkaloglu, J.C. Lim, T. Vincent, FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models, Eng. Struct. 49 (2013) 1068–1088. doi:10.1016/j.engstruct.2012.06.010.

T. Ozbakkaloglu, D.J. Oehlers, Manufacture and testing of a novel FRP tube confinement system, Eng. Struct. 30 (2008) 2448–2459. doi:10.1016/j.engstruct.2008.01.014.

Teng, J.G.; “FRP composites in civil engineering”, Vol. I. Elsevier Science Limited, 2001.

Teng J. G., Jiang T., Lam L. and Luo Y. Z. (2009), “Refinement of a Design-Oriented StressStrain Model for FRP-Confined Concrete” Journal of Composites for Construction, Vol. 13, No. 4, 269–278.

Teng, J. G., YU, T., WONG, Y. L. & DONG, S. L. 2007b. Hybrid FRP–concrete– steel tubular columns: Concept and behavior. Construction and Building Materials, 21, 846-854.

Thomas,J.: “FRP Strengthening – Experimental or Mainstream Technology?”. Concrete International. (ACI) June 1998.

T. Jiang, J.G. Teng, Theoretical model for slender FRP-confined circular RC columns, Constr. Build. Mater. 32 (2012) 66–76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.109.

T. Jiang, J.G. Teng, Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete, Eng. Struct. 29 (2007) 2968–2986. doi:10.1016/j.engstruct.2007.01.010.

Torroja Miret, E.; “Razón y ser de los tipos estructurales”. CSIC, tercera edición revisada. Colección Textos Universitarios, nº13. Madrid, 2007.

Toutanji, H. A. 1999. Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets. ACI Materials Journal, 96, 397-404.

TR55 2012. Technical Report Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials, 3rd edition, Concrete Society, UK.

X.S.X.G.Y.L.T. Chen, *Mechanical behavior of FRPstrengthened concrete columns subjected to concentric and eccentric compression loading.*, *Compos. Constr.* 17 (2013).

Van Gemert: “Repairing of concrete structures by externally bonded steel plates.” *Proc. International symposium on plastics in materials and structural engeneering. Prague, june 1981.*

XIAO, Q. G., TENG, J. G. & YU, T. 2010. *Behavior and modeling of confined high-strength concrete. Journal of Composites for Construction*, 14, 249-259.

XIAO, Y. & WU, H. 2000. *Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets. Journal of Materials in Civil Engineering*, 12, 139-146.

Wang, Y.C., and Restrepo, J.I. (2001). “Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets.” *ACI Struct. J.*, 98(3):377-385.

Wang Yung-Chih , Hsu K. (2007). “Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity.” *Composite Structures* 82 (2008) 132–139.

Winter, G; Nilson, A.H.; “Proyecto de estructuras de hormigón” (*Design of concrete structures*, ed. McGraw-Hill). Ed. Reverté, Barcelona, 1977.

Wu H and Xiao Y., *Compressive Behavior of Concrete confined by various types of FRP composites jackets, J. Reinf. Plast.* 22 (2003). doi:10.1177/073168403035430.

WU, Y. F. & ZHOU, Y. W. 2010. *Unified strength model based on Hoek-Brown failure criterion for circular and square concrete columns confined by FRP. Journal of Composites for Construction*, 14, 175-184.

WU, Y. & WEI, Y. 2015. *General Stress-Strain Model for Steel- and FRP- Confined Concrete. Journal of Composites for Construction*, 19, 04014069.

YANG, X., NANNI, A. & CHEN, G. *Effect of corner radius on the performance of externally bonded FRP reinforcement. . In: TELFORD, T., ed. Proc., 5th Int. Conf. On Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, 2001 London. 197-204.*

Y. H. ChaiM. J. N. PriestleyF. Seible, *Analytical Model for Steel-Jacketed RC Circular Bridge Columns, Struct. Eng. 120 (1994).*

Youssef, M. N., Feng, M. Q., and Mosallam, A. S. _2007_. “Stress-strain model for concrete confined by FRP composites.” *Composites, Part B*, 38(5–6), 614–628.

Y. Wu, L. Wang, *Unified strenght model for square and circular concrete columns confined by external jacket, J. Struct. Eng. ASCE. 135 (2009) 253–261.*